

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

ELIANE FERREIRA DA SILVA

**Potencial calorífico dos resíduos sólidos urbanos do Distrito de Vila Sônia, São Paulo/
SP.**

São Paulo

2024

**Potencial calorífico dos resíduos sólidos urbanos do Distrito de Vila Sônia, São Paulo/
SP.**

Versão Original

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Maria Eugenia Gimenez Boscov.

São Paulo

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Eliane Ferreira da

POTENCIAL CALORÍFICO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO DO DISTRITO DE VILA SÔNIA, SÃO PAULO-SP. / E.F. Silva – São Paulo, 2024.

58p.

Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química.

1 Resíduos sólidos urbanos. 2 Geração de energia. 3 Potencial calorífico. I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia química II.

SILVA, E.F. Potencial calorífico do resíduo sólido urbano do Distrito de Vila Sônia, São Paulo/SP. 2024. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Profa. Dra. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento _____

EPIGRAFE

"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes."

Isaac Newton, 1675.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Valdivino e Rosalina, ambos trabalharam e se doaram muito para que eu chegasse a este grau de estudo.

Agradeço os professores do curso, mestres e doutores que se dedicaram nas aulas e deram suporte para que eu escreva esse estudo.

Agradeço aos meus amigos Andressa Krauss Hansen e João Paulo Rodrigues e aos colegas da turma, que com muito companheirismo, apoio, alegria e paciência me ajudaram na conclusão do curso. Mesmo não os conhecendo pessoalmente, no dia a dia, ajudaram em dúvidas, em troca de experiências, em momentos divertidos, criou-se uma sintonia e amizade se tornando amigos do coração.

Agradeço ao Thiago Villas Bôas Zanon pela disponibilidade das tabelas da empresa Loga utilizadas neste estudo, pela idéia e indicação do tema, o que possibilitou a realização deste estudo.

Agradeço imensamente a orientadora Dra. Maria Eugênia Gimenez Boscov, pois além da dedicação nas orientações, me ajudou muito na construção do estudo. Com muita sabedoria e delicadeza me segurou pela mão e fez enxergar melhores formas de apresentação de texto, com correções, abordagens técnicas e conceitos. Me abrindo os olhos a melhor eficiência energética de resíduos.

Construir um mundo melhor sempre foi um sonho, ajudar minimamente a se recuperar é uma honra.

RESUMO

Incentiva-se o desenvolvimento de tecnologias e novas práticas para solucionar problemas relacionados à grande quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados em todo o mundo, entre elas a utilização dos RSU na geração de energia. Estudos apontam que a conversão de resíduos sólidos em vetores de energia secundária é uma realidade. A técnica permite produção de energia elétrica mais limpa, seja pela utilização do resíduo, seja pela utilização dos componentes na combustão, uma vez que é possível gerar energia com transportadores de energia secundária compatíveis com o gás (turbinas e motores a gás com alta eficiência elétrica). O objetivo deste estudo foi estimar o potencial calorífico de amostras de RSU do Município de São Paulo, subprefeitura do Butantã, Distrito de Vila Sônia. Realizou-se uma revisão bibliográfica para determinar quais frações não reaproveitáveis dos RSU para reciclagem/reuso ou compostagem têm potencial para geração de energia: embalagens, madeira, couro e trapos. Foram analisadas tabelas de dados da empresa Loga, dentre os anos de 2018 a 2023, compreendendo os relatórios de análise de RSU com dados gravimétricos e físico-químicos compreendidos nos períodos de 42º ao 56º quadrimestre de documentação fornecida pela empresa. Com as porcentagens médias e dados de literatura de poder calorífico das frações selecionadas, chegou-se a um valor de 290,80 kcal/kg, muito inferior ao obtido pelas amostras totais em ensaios laboratoriais de calorimetria. Os RSU do Distrito de Butantã são compostos em média de 51,3% de matéria orgânica, 11,5% de plástico mole e 4,7% de plástico duro, além de 9,0% de papel e papelão. Dada a dificuldade de reciclar plásticos e realizar a compostagem da matéria orgânica dos RSU, fica a reflexão se há atratividade para incinerar apenas a pequena quantidade de inservíveis com potencial de combustão, ou incinerar toda amostra para geração de energia sem realizar a separação de material orgânico, plásticos e papéis/papelões.

Palavras chave: resíduos sólidos urbanos, geração de energia, potencial calorífico.

ABSTRACT

The development of technologies and new practices is encouraged to solve problems related to the large amount of urban solid waste (MSW) generated around the world, including the use of MSW in energy generation. Studies indicate that the conversion of solid waste into secondary energy vectors is a reality. The technique allows to produce cleaner electrical energy, either through the use of waste or through the use of components in combustion, as it is possible to generate energy with secondary energy carriers compatible with gas (turbines and gas engines with high electrical efficiency). The objective of this study was to evaluate the calorific potential of MSW samples from the Municipality of São Paulo, subprefecture of Butantã, District of Vila Sônia. A bibliographical review was carried out to determine which non-reusable fractions of MSW for recycling/reuse or composting have potential for energy generation: packaging, wood, leather and rags. Data tables from the company Loga were analyzed, from the years 2018 to 2023, comprising MSW analysis reports with gravimetric and physicochemical data from the 42nd to the 56th 4-months periods of documentation provided by the company. Using the average percentages and literature data on the calorific value of the selected fractions, a value of 290.80 kcal/kg was reached, much lower than that obtained for the total samples in laboratory calorimetry tests. MSW in the Butantã District is composed of an average of 51.3% organic matter, 11.5% soft plastic and 4.7% hard plastic, in addition to 9.0% paper and cardboard. Given the difficulty of recycling plastics and composting organic matter from MSW, the question remains whether it is attractive to incinerate only the small fraction of unusable materials with potential for combustion, or to incinerate the entire sample to generate energy without separating the organic material, plastics and paper/cardboard.

Keywords: urban solid waste, energy generation, calorific potential.

LISTA D FIGURAS

Figura 01 – Esquematização do tratamento e análise dos componentes dos RSU.....	37
----------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poder calorífico de madeiras.....	36
Tabela 2 – Referenciamento dos locais de coleta por setor, distrito e período de coleta dos RSU.....	37
Tabela 3 – Composição gravimétrica das amostras do 42º ao 56º Quadrimestre	40
Tabela 4 – Análise Físico-Química – amostra do 42º ao 56º Quadrimestre.....	47
Tabela 5 – Estimativa de PCI em 1kg de RSU.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação temporal das frações dos componentes majoritários.....	45
Gráfico 2 – Variação temporal da fração de matéria orgânica.	46
Gráficos 3 - Variação temporal das frações de papel, plásticos, trapos, fraldas e vidros.....	46
Gráfico 4 - pH das amostras.....	49
Gráfico 5 – Variação do PCS das amostras segundo os relatórios da LOGA.....	50
Gráfico 6 – Variação temporal do PCI das amostras segundo os relatórios da LOGA.....	50
Gráfico 7 – Poder calorífico em função do teor de carbono.....	51
Gráfico 8 - Poder calorífico em função do teor de matéria orgânica.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGAS

CSR - combustíveis sólidos recuperados

EPI's – Equipamentos de proteção individual.

MJ - Megajoules

Kg - quilo

Kcal - quilocaloria

PCI – Potencial calorífico inferior

PCR - Poder calorífico dos resíduos

PCS – Potencial calorífico superior

RSU – Resíduos sólidos urbanos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	15
3. JUSTIFICATIVA.....	16
4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRAFICA	17
4.1 Conceituação.....	17
4.2 Histórico.....	19
4.3 Impactos Ambientais e Saúde Pública.....	21
4.4 Legislação – a Política Nacional de Resíduos Sólidos	22
4.6 Caracterização dos Resíduos de Aterro Sanitário.....	25
4.6.1 Composição típica dos resíduos em aterros no Brasil.....	25
4.6.2 Variações sazonais e regionais	27
5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICOS DOS RESÍDUOS.	29
5.1 Poder calorífico	29
5.2 O poder calorífico na avaliação do potencial energético dos resíduos.	29
5.3 Métodos de medição e unidades de medida.....	31
5.4 Fatores que influem no poder calorífico dos resíduos	32
6. MATERIAIS E MÉTODOS	34
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
8. CONCLUSÃO	52
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXO I – Tabela demonstrativa de poder calorifico inferior de materiais.....	60

1. INTRODUÇÃO

Incentiva-se o desenvolvimento de tecnologias e novas práticas para solucionar problemas relacionados à grande quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados em todo o mundo, desde formas de gestão as quais aloquem o resíduo de forma sustentável, até esforços para utilizar o resíduo, por exemplo, na geração de energia seja pela combustão ou pelo uso de gás gerado por esses resíduos (BASARAN, 2022).

O aterro sanitário foi uma forma encontrada para a deposição dos resíduos gerais (domésticos, comerciais, de varrição e limpeza pública) com garantia de proteção do meio ambiente e saúde pública. Os lixões ou aterros controlados são um problema de saúde pública, pois causam contaminação do solo, águas superficiais e lençol freático pelo chorume ou lixiviado, líquido gerado no processo de decomposição química e biológica dos resíduos, e da atmosfera pelo gás metano e gás carbônico, também produtos da decomposição. Os aterros sanitários, por outro lado, são projetados de maneira a prevenir a contaminação do solo, da atmosfera e das águas superficiais e subterrâneas. Contudo, exigem implantação adequada, operação e monitoramento cuidadosos, e ocupam áreas cada vez maiores e mais distantes dos locais de coleta. Faltam espaços para armazenamento do lixo, o que é um grande problema das cidades.

Um exemplo de gestão de RSU é a escala de Lansink, a qual estabelece a seguinte ordem de prioridades: prevenção, reciclagem, incineração com valorização energética, incineração e deposição em aterro. A visão da gestão evoluiu para a prevenção, recuperação, reutilização e reciclagem de materiais, por exemplo, papel, alumínio e vidro (ERIKSON, 2017).

No entanto, apesar da crescente atenção à prevenção e à sustentabilidade, a geração total de RSU tem crescido. A quantidade de resíduos gerados na União Europeia aumentou significativamente desde 2004, passando de 870 milhões de toneladas, para 1.221 milhões de toneladas em 2020 (EUROSTAT, 2022). Em termos percentuais o tratamento total de resíduos gerados subiu de 46%, em 2004, para 60%, em 2020, de acordo com os dados do gabinete de estatísticas europeu (BASARAN, 2022). Por outro lado, a quantidade de resíduos domésticos destinados em aterros tem reduzido, porém não o suficiente para minimizar essa preocupação. Em 2004, eram 1.027 milhões de toneladas destinadas em aterros sanitários, que passaram a 808 milhões em 2020, o que corresponde a uma percentagem de eliminação no tratamento total de resíduos de 54%, em 2004, que passou para menos de metade em 2020 (45%). No ano 2020, foi gerada 1,0 tonelada de resíduos por habitantes do espaço comum europeu, 39,2% dos quais foram reciclados, enquanto 13,3% foram depositados em aterros (ROSA, 2020).

Segundo a ABRELPE (2023), no Brasil no ano de 2022 foram gerados 81,8 milhões de toneladas de RSU, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias; 46,4 milhões de toneladas foram encaminhados para aterros sanitários (destinação ambientalmente adequada), ou seja, 61%, enquanto 29,7 milhões de toneladas (39%) tiveram destino ambientalmente inadequado (lixões e aterros controlados).

Uma alternativa interessante para a gestão sustentável de resíduos é a geração de energia com os materiais residuais do RSU. Após a retirada dos materiais reutilizáveis e dos recicláveis, a separação dos materiais orgânicos com grande potencial na geração de gás ou de compostagem, existem materiais que não têm um destino final exceto o aterro sanitário, os chamados rejeitos. São exemplos disso os plásticos de armazenamento de medicamentos, couros, papeis engordurados, papeis alumínio, papelão molhado ou danificado com gorduras, entre outros tipos de material para os quais não há processo de reaproveitamento no ciclo de gestão de resíduos. Assim, o aterro sanitário continua sendo o destino desses materiais (GOMES, 2017).

Porém, sob a ótica energética, todo material tem potencial químico para geração de energia, por meio de diversos processos (combustão, leitos fluidizados, pirólise, fornos rotativos e gaseificação por plasma).

Estudos apontam que a conversão de resíduos sólidos em vetores de energia secundária é uma possibilidade. A técnica permite produção de energia elétrica mais limpa, seja pela utilização do resíduo, seja pela utilização dos componentes secundários como o gás; uma vez que é possível gerar energia com transportadores de energia secundária compatíveis com o gás (turbinas e motores a gás com alta eficiência elétrica). Além disso, há a redução do volume depositado em aterros. A prevenção de contaminação do meio ambiente também permite uma maior penetração no mercado (BAŞARAN, 2022; GOMES, 2017).

Com o foco particular na geração de energia, há estudos do potencial calorífico dos componentes de resíduos não recicláveis e geralmente depositados em aterros. A China e países do Leste Europeu têm se desdobrado para desenvolver técnicas a fim de estudar o potencial energético a partir de resíduos sólidos domiciliares. Erikson (2017) comenta que ainda faltam estudos sobre o tema e aponta fatores que afetam sua aplicabilidade e adequação operacional por dificuldade financeira ou falta de incentivo à evolução das técnicas existentes.

Observam-se diferenças na maturidade tecnológica entre as instituições que realizam estudos sobre a utilização de RSU que não podem ser reciclados ou reutilizados, mas que têm potencial energético. É importante comparar os estudos e avaliar as tecnologias disponíveis.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é descrever o potencial calorífico e estimar o potencial calorífico de amostras de RSU do Município de São Paulo, subprefeitura do Butantã, Distrito de Vila Sônia.

Como objetivos secundários pretende-se:

- Apontar os materiais que não têm reciclagem ou destino de reuso catalogado pela literatura;
- Apresentar o potencial energético dos resíduos;
- Apresentar as tecnologias citadas em literatura para extração de energia dos RSU;
- Obter a composição gravimétrica média dos RSU da área estudada.

3. JUSTIFICATIVA

Atualmente as megalópoles, com seu crescimento populacional desenfreado, apresentam um desafio de saúde pública, a destinação dos resíduos sólidos urbanos. Ainda são utilizados em muitos municípios depósitos a céu aberto de lixo, que ao longo do tempo geram contaminação do solo, água e ar, e tem grande potencialidade de transmissão de doenças. Mesmo os aterros sanitários, que são estruturas projetadas para prevenir a contaminação do meio ambiente e problemas de saúde pública, são problemáticos devido à necessidade de projeto, operação e monitoramento cuidadosos ao longo de anos, além de ocuparem espaços cada vez maiores nos meios urbanos.

A gestão de solos contaminados (GAC) possui estratégias para auxiliar na descontaminação do solo, porém se for possível atuar na prevenção da contaminação e ainda no estudo da utilização dos resíduos poluidores em produtos geradores de energia, a ciência estará promovendo maior qualidade de vida e mercado a essa nova forma de transformação energética.

Ao analisar todos esses fatores é que se justifica a realização deste trabalho, sob estudos de diversos projetos piloto e a fim de demonstrar a possibilidade de transformação energética.

4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRAFICA

4.1 Conceituação

Aterro sanitário

O termo Aterro Sanitário compreende tanto o espaço destinado para a disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, como a massa de resíduos e as operações e dispositivos para garantia de proteção ambiental e à saúde humana (BOSCOV, 2008). Segundo a NBR 8419/1992 (ABNT, 1992), o aterro sanitário deve empregar técnicas e tecnologias apropriadas para minimizar os impactos ambientais e os danos à saúde pública. Através de técnicas de engenharia os resíduos sólidos são confinados à menor área e ao menor volume possíveis, além de serem cobertos com uma camada de terra na conclusão de cada trabalho, ou intervalos menores, se necessário (SAIANI, 2020). Portanto o local para ser denominado aterro sanitário deve apresentar no mínimo as seguintes características:

Unidades Operacionais:

- Possibilidade de alojamento para vários tipos de resíduos em células especiais;
- Células para rejeitos oriundos do lixo domiciliar;
- Isolamento inferior impedindo que o chorume ou lixiviado atinja o lençol freático;
- Sistema de coleta e tratamento do chorume ou lixiviado, provindo da decomposição da matéria orgânica e da água infiltrada na massa de resíduos;
- Sistema tratamento e de coleta dos gases produzidos na massa de resíduos;
- Isolamento superior feito diariamente evitando contaminação do ar e o deslocamento de animais que se alimentam dos resíduos orgânicos (cobertura diária);
- Isolamento superficial mais robusto no fechamento da célula ou aterro (cobertura final);
- Sistema de drenagem pluvial para evitar que a água da chuva penetre no aterro, gerando mais chorume ou lixiviado;
- Existência de pátio de estocagem de materiais.

Unidades de apoio:

- Cercamento e iluminação;
- Barreira vegetal;
- Estradas de acesso e de serviço;

- Balança rodoviária e sistema de controle de resíduos;
- Guarita de entrada e prédio administrativo;
- Oficina e borracharia.

Saiani (2020) e Sheller (2023) apontam que, mesmo obedecendo as exigências técnicas estruturais e construtivas, ainda pode haver a possibilidade de impacto ambiental. Há que se avaliar também as probabilidades de impacto local e sobre a área de influência do empreendimento e se buscar medidas para mitigá-los.

Aterro controlado

Trata-se de técnica que consiste em uma tentativa de transformar os lixões em aterros, minimizando os impactos ambientais associados ao acúmulo de lixo em áreas sem nenhum tipo de tratamento para efluentes líquidos e preparação do solo. É uma forma intermediária entre o lixão e o aterro sanitário, com esforços de melhoria operacional e física de antigos lixões: a área é isolada e cercada, com controle de acesso; somente resíduos não perigosos podem ser direcionados; o resíduo é compactado e coberto com uma camada de solo após cada cota de disposição; após o seu encerramento, o local recebe uma camada de argila e solo e é realizado o plantio de gramíneas. Porém, ainda é presente a contaminação do solo e de águas superficiais, uma vez que não há qualquer sistema de coleta de chorume e gases nocivos ou impermeabilização do solo (SZIGETHY, 2020).

Lixão

Trata-se da pior forma de disposição final dos resíduos, pois é um grande depósito de resíduos, sem controle, a céu aberto. Não há qualquer planejamento ou medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Os resíduos, de todos os tipos, são depositados misturados – desde domiciliares, urbanos, industriais e hospitalares. Nesses locais, não há proteção contra a contaminação do solo, das águas superficiais e lençol freático pelo chorume ou lixiviado (CETESB, 2013). Infelizmente ainda estão presentes em cidades pequenas ou regiões mais pobres do nosso país, frequentemente abertos de forma clandestina.

Disposição adequada

Trata-se da distribuição e armazenamento de forma ordenada de resíduos sólidos urbanos em aterros, seguindo normas operacionais específicas a fim de evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (Artigo 3º, Inciso VIII da Lei nº 12.305/2010). Corresponde, portanto, à definição de aterro sanitário.

Disposição inadequada

Trata-se da distribuição e armazenamento dos resíduos sólidos urbanos em locais sem qualquer classificação, triagem em locais sem preparo. São locais em que os resíduos são descartados a céu aberto (OLISA, 2018). Atualmente, o termo compreende lixões e aterros controlados.

RSU

Resíduos Sólidos Urbanos são aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas (resíduos domiciliares) e os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (resíduos de limpeza urbana) (SINIR, 2024).

A Lei nº 14.026/2020 (Novo Marco Legal do Saneamento), que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, em seu art. 3º-C diz que os resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços cuja responsabilidade pelo manejo não seja atribuída ao gerador pode, por decisão do poder público, ser considerado resíduo sólido urbano.

4.2 Histórico

O Brasil enfrenta desafios significativos em relação à gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos, devido à sua vasta extensão territorial e diversidade socioeconômica. A existência de aterros controlados e lixões (disposição inadequada) é um dos problemas mais críticos nesse contexto, com sérias consequências ambientais, sociais e de saúde pública. A contextualização desse problema envolve diversos aspectos inter-relacionados e diversas iniciativas e programas visam promover soluções integradas de gestão de resíduos no Brasil.

A partir dos anos 50 houve rápida e progressiva urbanização no Brasil e o crescimento populacional no país acarretou o aumento do consumo; consequentemente, aumentou também

a geração de resíduos. Na década de 60 a cidade de São Paulo já enfrentava problemas devido à inexistência de políticas de controle de resíduos e políticas ambientais, como a ausência de local adequado e fixo para depósito de resíduos urbanos e a incidência de poluição de águas; com o passar dos anos a situação piorou. A infraestrutura para evitar tais infortúnios e gerir resíduos não acompanhou o crescimento urbano.

O primeiro aterro para disposição de resíduos sólidos urbanos surgiu em 1974, o de Lauzane Paulista em Vila Santa, Zona Norte da Cidade de São Paulo, sem infraestrutura adequada, pois na época não havia políticas específicas de gestão de resíduos. A partir dos anos 70 iniciaram-se as discussões sobre as questões ambientais urbanas apontando problemas de poluição hídrica, atmosférica e destinação dos resíduos sólidos (STUERMER, 2011).

Segundo Ferreira (2018), durante os anos 80, as migrações e o crescimento urbano desordenado geraram um processo de urbanização desenfreado e sem planejamento, que resultou em concentrações urbanas densas e expansão urbana sem controle. Sem gestão ou coleta de resíduos, as cidades que cresciam sofriam por falta de infraestrutura adequada, planejamento urbano deficiente e recursos limitados. Nessa época passam a surgir locais de disposição de resíduos inadequados por todo território nacional, os chamados lixões a céu aberto.

A partir da década de 90, iniciaram-se os aterros sanitários segundo o conceito atual, que engloba confinamento e compactação dos resíduos e coleta e tratamento de efluentes. A construção de novos aterros segundo preceitos técnicos e ambientais adequados, assim como a encerramento de aterros controlados e lixões, vêm ocorrendo paulatinamente ao longo dos últimos 30 anos. Porém, mesmo com esses esforços e mesmo após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), ainda 39% da massa de RSU coletados no Brasil foram dispostos inadequadamente em 2022 (ABRELPE, 2023). A disposição adequada de RSU em massa foi de 36,6%, 37,2%, 43,5%, 74,3% e 71,6%, respectivamente, nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul (ABRELPE, 2023)

Fuss (2022) comenta que ao longo do tempo houve falha por parte dos governos no planejamento e investimentos na gestão de resíduos sólidos residenciais, e que a falta de investimentos em infraestrutura adequada para a gestão de resíduos sólidos é uma das principais causas da disposição inadequada. Segundo pesquisa do IPEA (2020), respondida por 3.556 municípios, estima-se que existam no país 2.307 unidades de disposição final, sendo 640 aterros e 1.667 lixões. Segundo levantamento feito por especialistas da Orizon Valorização de Resíduos, empresa responsável por fazer a gestão de diversos eco parques no Brasil, existem

cerca de 3 mil aterros controlados no país (GERAQUE, 2021). Em 2021, o setor de resíduos foi responsável pela emissão de 91,12 milhões de toneladas de CO₂ e a principal contribuição (64,1%) está associada à disposição de resíduos sólidos em aterros controlados, lixões e aterros sanitários (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023). De acordo com Scheller (2023), cada brasileiro produz, em média, 343 quilos de lixo por ano: no total, cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos são geradas anualmente no país; segundo o autor, a ausência de controle, seja do poder público ou de organizações não governamentais, leva à criação de áreas de descarte clandestino e improvisado.

4.3 Impactos Ambientais e Saúde Pública

Observa-se que os lixões, aterros controlados e aterros sanitários não estão próximos a grandes centros, mas são alocados nas periferias. Devido aos altos preços para moradia e investimento insuficiente na construção de casas populares, o descarte dos sólidos está também atrelado às desigualdades socioeconômicas. Parte da população, por condições econômicas precárias, acaba construindo suas casas próximo aos locais de disposição de resíduos, muitas vezes conseguindo seu sustento a partir de catação de materiais desses locais. As desigualdades socioeconômicas exacerbam os problemas relacionados à gestão de resíduos. Comunidades vulneráveis, áreas periféricas e regiões desfavorecidas muitas vezes enfrentam maior exposição aos impactos negativos dos lixões, incluindo poluição ambiental, saúde pública precária e deterioração da qualidade de vida (GOMES, 2017).

Segundo Gallo (2014), um aspecto significativo do sistema de gestão de RSU do Brasil envolve catadores informais, conhecidos como “catadores”. Esses indivíduos muitas vezes trabalham em condições perigosas, sem proteção adequada e vasculhando lixões para coletar materiais recicláveis para vender; assim, acabam entrando em contato com os mais diversos tipos de resíduos. Embora desempenhem um papel crucial na reciclagem e na redução de RSU dispostos, o seu trabalho muitas vezes não é reconhecido e carece de apoio formal.

A deposição inadequada de resíduos resulta em sérios impactos ambientais como: contaminação do solo, poluição da água, emissões de gases de efeito estufa (a decomposição de materiais orgânicos em aterros produz metano, um potente gás com efeito de estufa que contribui para as alterações climáticas) e degradação de ecossistemas. Okamura (2013) também menciona diversos problemas de saúde para as comunidades próximas. Quando o local de disposição não possui um controle após desativação, a construção de casas sobre lixões desativados ocasiona sérios riscos de saúde e de vida. Por exemplo, no bairro do Grajaú, na

cidade de São Paulo, existe um lixão que foi aterrado há 10 anos e hoje há casas construídas no local. Essas condições contribuem para problemas de saúde pública, como doenças respiratórias, gastrointestinais e dermatológicas, afetando especialmente as populações mais vulneráveis.

Ao adotar soluções integradas de gestão de RSU e promover práticas sustentáveis, o Brasil pode mitigar esses impactos adversos. Algumas soluções integradas de gestão de resíduos são a promoção da reciclagem e da compostagem, o investimento em tecnologias de transformação de resíduos em energia, a melhoria das práticas de gestão de aterros, a formalização do papel dos catadores informais e ainda a profissionalização dos mesmos. Enfrentar os desafios da gestão de RSU no Brasil requer colaboração entre os setores público e privado, organizações da sociedade civil e comunidades locais; parcerias público-privadas, iniciativas comunitárias e soluções inovadoras são essenciais para o desenvolvimento de práticas sustentáveis de gestão de RSU.

Deve-se lembrar que mesmo aterros sanitários projetados, construídos e operados segundo as melhores prática podem causar impactos adversos no caso de problemas nos dispositivos de proteção ambiental (sistemas de impermeabilização, drenagem e tratamento de líquidos e gases), rupturas da massa de resíduos e outros acidentes a que todas as obras de engenharia podem estar sujeitas.

4.4 Legislação – a Política Nacional de Resíduos Sólidos

No ano de 2010, a Lei nº 12.305/2010 regulamentou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, as responsabilidades dos geradores e do poder público e os instrumentos econômicos aplicáveis, a nível nacional.

A legislação foi responsável pela definição de resíduos e rejeitos, estabelece hierarquia preferencial de tratamento dos resíduos e em último caso esclarece quais materiais devem ser direcionados para o aterro sanitário

“Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

XV - rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

XVI - resíduos sólidos: 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.” (BRASIL, 2010).

A PNRS estabelece 11 princípios:

I - A prevenção e a precaução;

II - O poluidor-pagador e o protetor-recebedor;

III - A visão sistêmica;

IV - O desenvolvimento sustentável;

V - A ecoeficiência;

VI - A cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade;

VII - A responsabilidade compartilhada;

VIII - O reconhecimento do RSU reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania;

IX - O respeito às diversidades locais e regionais;

X - O direito da sociedade à informação e ao controle social;

XI - A razoabilidade e a proporcionalidade.

Com esses princípios é possível nomear os agentes, ações, os direitos e ter base para novos caminhos dentro da gestão de resíduos, caminhos a serem realizados na gestão e na logística dos materiais envolvidos e, assim melhor entendimento para a realização de fiscalização sobre os locais de descarte de lixo. Também auxiliou na organização, nomeação de agentes e ações. e determinou que o setor público e o privado realizem a gestão de resíduos para evitar que esses materiais sejam destinados incorretamente aos lixões.

A PNRS também incentiva o desenvolvimento de máquinas e equipamentos para a indústria da reciclagem, ao estabelecer metas de redução, reutilização e reciclagem de resíduos sólidos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos atuou na definição de metas para a eliminação e recuperação dos lixões, a partir da criação de aterros sanitários, com o objetivo de combater as

áreas contaminadas. A PNRS deu prazo para o fechamento de lixões nos municípios sob pena de multa pela Lei 9.605 de crimes ambientais. A meta inicial para erradicação dos lixões, 2014, já teve que ser estendida para 2024; mas a nova meta continua a não ser atendida.

Embora o Brasil tenha uma legislação robusta relacionada à gestão de RSU, a implementação e a fiscalização efetiva permanecem desafios significativos; a implementação e a fiscalização em nível local variam significativamente. A falta de conformidade, fiscalização rigorosa e responsabilização adequada contribui para a persistência de aterros inadequados em diversas regiões do país. Muitos municípios lutam com financiamento, recursos e conhecimentos técnicos inadequados para gerir eficazmente os RSU (SCHELLER, 2023).

Em 2012, o Ministério do Meio Ambiente pulicou o Manual de Orientação para Planos de Gestão de Resíduos (MMA, 2012). A Resolução RDC 222/2018 – regulamenta as boas práticas de gerenciamento dos resíduos de serviços de saúde e dá outras providências. Ainda em relação à legislação, o Projeto de Lei 4481/21 restringe o acesso a lixões e aterros sanitários, estabelecendo que a entrada nesses locais só será permitida a pessoas previamente autorizadas pelo Poder Público e/ou pela respectiva empresa de reciclagem. A proposta proíbe pessoas que não sejam qualificadas ou que não trabalhem em área de coleta seletiva ou órgão público com competência para tanto de entrar ou permanecer nos lixões e aterros. Ainda segundo o texto, o ingresso nesses locais deverá ser realizado com o uso de equipamentos de proteção individual.

4.5 Geração de energia

Quanto à recuperação energética, a PNRS coloca:

“§ 1o Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.”

(BRASIL, 2010).

A geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos ainda não se desenvolveu, pois faltam incentivos. É necessário separar e tratar o material a ser utilizado, e é necessário espaço diferente do tradicional. A energia é cara por conta de tecnologia, necessitando de incentivos fiscais e investimentos. Atualmente é possível gerar energia com resíduos através de reações

químicas como a pirólise, através do uso de sua decomposição com os biodigestores, a utilização do gás metano liberado em sua decomposição nos aterros e através da construção de caldeiras. Existem esforços para dar andamento a esse propósito de geração de energia a partir dos RSU. O Projeto de Lei nº 4.603/2021, de autoria da senadora Rose de Freitas (MDB-ES), sugere alterações na PNRS, prevendo incentivos para geração de energia a partir de incineração do lixo como fonte térmica de energia elétrica, o que pode reduzir em 90% o volume dos resíduos e rejeitos, promovendo a incineração dos materiais para geração de energia. Também foi aprovada em dezembro de 2022 a Lei 302/2018, que estabelece estímulos à produção de biogás, biometano e energia elétrica a partir do aproveitamento de RSU em aterros sanitários, focando na decomposição no aproveitamento de biogás e biometano principalmente. A proposta incluiu na PNRS incentivos para que haja medidas indutoras, incentivos fiscais, financeiros e linhas de financiamento por parte do poder público para geração de energia a partir de resíduos de aterros (AGÊNCIA SENADO, 2022).

Portanto, a possibilidade de uso do lixo para a geração de energia existe no Brasil desde 2010, como parte da PNRS, mas ainda se enfrentam muitas resistências. Ainda há barreiras como a falta de tecnologia específica para a geração de energia com resíduos sólidos, incentivos fiscais, falta de logística e falta de treinamento, entre outros problemas. Os incentivos fiscais foram aprovados em 2022, mas ainda não se sentem as repercussões da lei. Segundo Geraque (2021), em face das 80 milhões de toneladas geradas pelas cidades a cada ano, dados da Agência Nacional de Energia Elétrica indicam que a produção de energia a partir de RSU se resume a 220 MW de potência instalada, aproximadamente 0,1% da matriz elétrica brasileira, a despeito de avaliações que indicam potencial para alcançar 3%, suficiente para abastecer todo o estado de Pernambuco caso fosse integralmente aproveitado.

Hoje, o segmento se resume a 31 empreendimentos outorgados pela Aneel, a ampla maioria no estado de São Paulo. Um hiato de quase uma década entre a lei 12.305/2010 e a norma que viria a disciplinar o uso dos RSU como fonte de energia explica em parte porque a fonte não apresenta investimentos no país.

4.6 Caracterização de Resíduos de Aterro Sanitário

4.6.1 Composição típica dos resíduos em aterros no Brasil.

A composição dos RSU é influenciada por diversos fatores, compreendendo características regionais, padrões de consumo, atividades industriais, práticas de gestão de

resíduos e condições socioeconômicas locais (FUSS, 2017; ERIKSSON, 2017). Embora a composição varie entre as diferentes localidades e regiões, algumas características gerais são identificadas.

Resíduos Orgânicos Putrescíveis:

Os resíduos orgânicos, como restos de alimentos, resíduos de jardim, folhas, madeira e materiais biodegradáveis, frequentemente representam uma proporção significativa dos resíduos em aterros. A decomposição anaeróbica desses materiais gera metano, um gás de efeito estufa potente, contribuindo para o aquecimento global e impactos ambientais adversos (SCHNABEL, 2021).

Resíduos Inorgânicos ou Orgânicos Não Putrescíveis:

Compreendem uma ampla variedade de materiais, como plásticos, metais, vidros, borrachas e outros materiais não biodegradáveis. Dentre esses, os aterros sanitários não devem receber pneus, de acordo com a Resolução Conama 416/2009.

Resíduos Perigosos e Tóxicos:

São rejeitos perigosos e tóxicos, como produtos químicos, solventes, materiais contaminados, baterias, lâmpadas fluorescentes e materiais hospitalares, quando dispostos inadequadamente, representam um sério risco para o meio ambiente, saúde pública e segurança (PAPARI, 2021). O aumento do consumo de produtos descartáveis, embalagens e produtos eletrônicos contribui para o aumento da presença desses materiais nos aterros não controlados. Atualmente resíduos perigosos devem ser classificados, rastreados e tratados pelos seus geradores a fim de causar o menor impacto ambiental possível. Assim, os aterros sanitários não devem receber, entre outros, pilhas e baterias, óleo lubrificante usado ou contaminado e embalagens de agrotóxicos, segundo as resoluções CONAMA 401/2008, 362/2005 e 465/2014.

Resíduos de Construção e Demolição (RCD):

Segundo Scheller (2023), os resíduos de construção e demolição, como concreto, tijolos, argamassa, cerâmicas e materiais de isolamento, são comumente encontrados em aterros controlados e lixões. Esses resíduos, no entanto, não devem ser dispostos e sim reciclados e reutilizados, de acordo com as resoluções CONAMA 307/02 e 448/12. Existem em São Paulo os chamados Eco Pontos, espaços adequados oferecidos por parte de Prefeituras de São Paulo,

Osasco e Ribeirão Preto para descarte de materiais que não se consegue descartar via coleta de lixo ou coleta seletiva; tais como entulho, restos de poda, estofados e móveis velhos, óleo de cozinha, plásticos, vidros, metais e papelão. Os RCD devem ser destinados a locais próprios para reciclagem de acordo com a Lei Federal nº12305/2010; porém, a falta de práticas adequadas por parte da população e a falta de gerenciamento/ fiscalização e reciclagem de RCD acarreta degradação ambiental, desperdício de recursos e descarte irregular em esquinas, áreas de mananciais e lixões.

Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (e-waste ou REEE):

É o mais novo tipo de resíduo, provindo da indústria eletrônica; trata-se de um material altamente poluente (LEE, 2021). O descarte inadequado de equipamentos e componentes eletrônicos, como computadores, telefones celulares, eletrodomésticos e equipamentos eletrônicos obsoletos, baterias, cigarros eletrônicos é uma preocupação crescente em aterros controlados e lixões. A presença de componentes tóxicos, metais pesados e materiais recicláveis nos REEE requer abordagens específicas de gestão, reciclagem e disposição final para minimizar os impactos ambientais, sociais e de saúde pública associados (MOTHGARE, 2015).

A composição típica do material em disposição inadequada no Brasil reflete os desafios complexos e multifacetados associados à gestão inadequada de RSU. Segundo Kayaba (2018), a presença de resíduos orgânicos, inorgânicos, perigosos, tóxicos, de construção, demolição e eletrônicos destaca a necessidade de fiscalização para que a legislação e as políticas públicas sejam eficazes.

4.6.2 Variações sazonais e regionais

As variações sazonais e regionais desempenham um papel crucial na dinâmica e impactos dos aterros (GOMES, 2017). Essas variações podem ser atribuídas a uma série de fatores, incluindo características climáticas, padrões de consumo, atividades industriais, práticas de gestão de RSU e condições socioeconômicas específicas de cada região, alterando a composição do material, sua umidade, pH e conteúdo orgânico, por exemplo.

As estações do ano (verão, outono, inverno e primavera), influenciam significativamente a quantidade e composição dos materiais depositados em aterros. De acordo com Honcharuk (2023), durante os meses de verão pode haver um aumento no consumo de

produtos descartáveis, embalagens, alimentos e bebidas, resultando em volumes mais altos de substratos orgânicos e inorgânicos.

A ocorrência de eventos festivos, feriados e celebrações, como carnaval, festas juninas e festas de fim de ano, pode levar a picos sazonais no descarte de papéis laminados, coloridos e plásticos tipo PET. Como exemplo, as festividades de Natal elevam o descarte de embalagens de papelão e papéis de presente. A produção excessiva de lixo urbano durante esses períodos requer estratégias temporárias de gestão, coleta e disposição para lidar com volumes aumentados dos detritos (KAYABA, 2018).

Em relação às variações regionais, podem ser citadas a influência da densidade populacional e urbanização, as atividades econômicas e as práticas culturais. Regiões com alta densidade populacional e taxas aceleradas de urbanização tendem a gerar maiores volumes de RSU. Segundo Gomes (2017), as áreas metropolitanas tendem a ter alto volume de plástico tipo PET, vidro e metais. Segundo Basaran (2022), os centros urbanos tendem a ter maior volume de plástico, papelão, metais e papéis laminados; e nas áreas rurais a composição de resíduos é predominantemente orgânica segundo Honcharuk (2023). Em zonas rurais, a utilização de material orgânico em adubo e a implantação de biodigestores, devido ao alto volume de resíduo de origem orgânica, e a cultura de queima de resíduos sólidos como papéis, acarretam a redução da taxa de geração de resíduos per capita nessas localidades.

As variações regionais na atividade industrial, comercial e agrícola influenciam a composição, quantidade e características dos resíduos gerados. Regiões com setores industriais desenvolvidos, zonas comerciais intensivas ou atividades agrícolas expansivas podem apresentar desafios específicos relacionados à gestão de resíduos perigosos, tóxicos, volumosos e especializados, exigindo abordagens personalizadas e soluções adaptadas às necessidades locais (GARCIA, 2018).

As práticas culturais, socioeconômicas e comportamentais influenciam as variações regionais na geração, separação, coleta e disposição de lixo. De acordo com Moutaz (2019) diferentes regiões têm preferências culturais, sistemas de valores, hábitos de consumo distintos, níveis de conscientização ambiental e engajamento comunitário, resultando em padrões variados de gestão de RSU e impactos associados.

5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS.

5.1 *Poder calorífico*

O poder calorífico é uma propriedade física fundamental que descreve a quantidade de energia liberada na forma de calor por uma determinada quantidade de material combustível quando este é completamente queimado em condições específicas. Em outras palavras, o poder calorífico representa a capacidade intrínseca de um material em produzir energia térmica através de sua combustão. Existem dois tipos principais de poder calorífico:

- **Poder Calorífico Superior (PCS):**

O Poder Calorífico Superior refere-se à quantidade total de energia liberada durante a combustão completa de uma substância combustível, considerando a condensação do vapor d'água produzido durante a combustão. Isso significa que o PCS inclui a energia liberada quando o vapor d'água condensa de volta ao estado líquido, o que aumenta o valor energético total. O PCS é geralmente expresso em unidades como quilocalorias por quilo (kcal/kg) ou megajoules por quilo (MJ/kg), e é frequentemente utilizado para combustíveis líquidos e gasosos, como gasolina, diesel e gás natural (HONCHARUK, 2023).

- **Poder Calorífico Inferior (PCI):**

De acordo com Honcharuk (2023), o Poder Calorífico Inferior refere-se à quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma substância combustível, sem considerar a energia recuperada da condensação do vapor d'água produzido. Isso significa que o PCI não inclui a energia liberada quando o vapor d'água condensa, resultando em um valor energético inferior em comparação com o PCS. O PCI é geralmente expresso em unidades como quilocalorias por quilo (kcal/kg) ou megajoules por quilo (MJ/kg), e é frequentemente utilizado para combustíveis sólidos, como carvão, biomassa e resíduos.

Segundo Garcia (2018), a depender do contexto e da aplicação específica, do local de estudo ou necessidades, o poder calorífico também pode ser expresso em outras unidades, como BTU (Unidade Térmica Britânica), joules por grama (J/g) ou calorias por grama (cal/g).

5.2 *O poder calorífico na avaliação do potencial energético dos resíduos.*

Segundo Fuss (2022), ao determinar o poder calorífico de um material, é possível identificar quanta energia pode ser gerada a partir da combustão desse material, o que é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento energético, como a

produção de eletricidade, calor ou biogás. A determinação precisa do poder calorífico de um material, o qual será utilizado como combustível, é crucial para diversos setores e aplicações, incluindo a indústria de energia, processos de combustão, engenharia de processos, pesquisa e desenvolvimento de novos combustíveis e tecnologias de aproveitamento energético (FERREIRA, 2018).

Além disso, o conhecimento do poder calorífico permite avaliar a eficiência de diferentes combustíveis, otimizar processos de combustão, calcular a quantidade de energia gerada e desenvolver estratégias sustentáveis para a gestão de resíduos e recursos energéticos. Em resumo, o poder calorífico é uma medida fundamental para a avaliação, análise e aplicação de materiais combustíveis em diversas aplicações industriais, comerciais e acadêmicas.

A gestão inadequada de aterros sanitários representa desafios significativos em termos de impactos ambientais, riscos à saúde pública, poluição do solo, água e ar, e desperdício de recursos. No entanto, também existem oportunidades potenciais para aproveitar o poder calorífico dos resíduos através de tecnologias de recuperação de energia, como a produção de biogás, combustíveis sólidos recuperados (CSR) ou incineração controlada (KAYABA, 2018).

Otimização de Processos de Combustão:

Compreender o poder calorífico dos resíduos permite otimizar os processos de combustão, garantindo uma eficiência máxima na conversão de energia. Isso é especialmente relevante para a indústria e as instalações de tratamento dos rejeitos a que se busca maximizar a recuperação de energia e minimizar as emissões poluentes (GOMES, 2017).

Redução do Impacto Ambiental:

O estudo do poder calorífico dos resíduos (PCR) contribui para a redução do impacto ambiental associado à disposição inadequada dos mesmos. Ao identificar substratos com alto poder calorífico, é possível desenvolver estratégias de tratamento e disposição que priorizem a recuperação de energia, reduzindo a necessidade de aterros sanitários e mitigando as emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos (ROSA, 2014).

Tomada de Decisões Baseada em Evidências:

O conhecimento do PCR fornece informações fundamentadas para a tomada de decisões em políticas públicas, investimentos em infraestrutura e desenvolvimento de projetos de gestão de resíduos. Ao analisar o potencial energético das amostras, os tomadores de decisão podem

desenvolver estratégias mais eficazes e sustentáveis para o gerenciamento das mesmas e a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis (SCHNABEL, 2021).

Promoção da Economia Circular:

A análise do PCR está alinhada com os princípios da economia circular, que visa minimizar o desperdício e maximizar o valor dos recursos. Ao identificar e aproveitar esse potencial, é possível promover práticas de reciclagem, reutilização e recuperação de energia, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e econômica (SCHNABEL, 2021).

Inovação e Desenvolvimento Tecnológico:

O estudo do PCR impulsiona a inovação e o desenvolvimento tecnológico em áreas como engenharia de processos, ciências ambientais, energias renováveis e gestão de resíduos. Segundo Saveyn (2016), ao entender melhor as características dos materiais descartados e seu potencial energético, os pesquisadores e profissionais podem desenvolver soluções mais eficientes, econômicas e sustentáveis para o aproveitamento dos materiais e a geração de energia. Bonsmans (2010) relata sobre as tecnologias para essa extração de energia elétrica através de processos termoquímicos como a combustão, gaseificação ou pirólise dos resíduos com a necessidade da construção de reatores químicos ou caldeiras. Na gaseificação e pirólise o RSU é transformado em combustíveis gasosos, e líquidos no caso da pirólise. O material queimado gera vapores a alta pressão e temperatura, que fazem trabalhar um gerador de turbinas a vapor. Ressalta que o investimento é alto, e países como China e Espanha já se valem da tecnologia.

5.3 Métodos de medição e unidades de medida.

Calorimetria Direta:

O método envolve a utilização de um calorímetro para medir diretamente a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma amostra do material combustível (PAPARIS, 2021). O calorímetro é um instrumento utilizado na medição de calor - também chamado de energia térmica - envolvido numa mudança de estado de um sistema, que pode envolver uma mudança de fase, de temperatura, de pressão, de volume, de composição química ou qualquer outra propriedade associada com trocas de calor. Pode ser construído ou adquirido no comércio, a diferença está na fidelidade dos resultados apresentados. É um aparelho que consegue mensurar a energia térmica (ou calor) trocada entre os sistemas termodinâmicos que possuem

temperaturas distintas, sendo isolado termicamente do meio em que está inserido. É um equipamento laboratorial, que necessita de calibragem, com isolamento térmico eficiente para que seja medida de forma precisa a quantidade de calor expelida pela queima da amostra.

Análise Química e Cálculos Teóricos:

Alguns combustíveis, como hidrocarbonetos, podem ter seu poder calorífico estimado com base na análise química de sua composição molecular (PAPARIS, 2021). Utilizando informações sobre a estrutura e composição do combustível, é possível realizar cálculos teóricos para determinar o poder calorífico esperado com base nas reações químicas envolvidas na combustão. Bosmans (2010) aponta que para cada kcal extraída em combustão é possível obter 0,001163 kW/h (quilowatt-hora).

Métodos Instrumentais:

Avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de métodos instrumentais, como a espectroscopia e técnicas de análise térmica, para determinar o poder calorífico de materiais combustíveis. Estes métodos utilizam equipamentos especializados para monitorar e analisar as propriedades físicas e químicas dos materiais durante a combustão, proporcionando informações detalhadas sobre a energia liberada (HONCHARUK, 2023).

5.4 Fatores que influem no poder calorífico dos resíduos

Diversos fatores podem influenciar no PRC, entre os quais se destacam:

Composição:

Um dos principais desafios associados ao poder calorífico dos resíduos é a complexidade da composição dos materiais depositados. A presença de componentes orgânicos, inorgânicos, perigosos, tóxicos e diversos materiais, como plásticos, madeira, papel, tecidos, borrachas e metais, contribui para a variação do poder calorífico, dependendo da quantidade, qualidade e características específicas de cada componente. Fuss (2022) aponta que a presença de uma variedade de escórias, incluindo orgânicos, inorgânicos, perigosos e tóxicos, resulta em uma gama diversificada de potenciais energéticos, emissões e impactos ambientais. A combustão de materiais orgânicos, como restos de alimentos e materiais biodegradáveis, pode gerar energia, mas também contribui para a emissão de gases de efeito estufa, como metano e dióxido de carbono. Existe a alternativa de utilização do próprio gás gerado no aterro, porém esse estudo focou na combustão dos mesmos.

Estado da Decomposição

Restos mais antigos, parcialmente decompostos ou sujeitos a processos anaeróbicos podem apresentar poder calorífico diferente em comparação com resíduos recentes, frescos ou em decomposição aeróbica, devido às alterações químicas, físicas e biológicas ao longo do tempo (HASAN, 2017). Condições anaeróbicas favorecem a produção de metano, um gás de efeito estufa potente, e podem influenciar negativamente a eficiência da combustão e a qualidade da energia gerada. Bosmans (2010) relata que a presença desses componentes residuais em diferentes estágios de decomposição pode resultar em variações no poder calorífico ao longo do tempo, exigindo monitoramento contínuo e abordagens adaptativas de gestão de RSU.

Umidade dos Resíduos:

Resíduos úmidos, molhados ou saturados podem apresentar poder calorífico inferior em comparação com materiais secos, pois a presença de água dificulta a ignição, o início da combustão, devido à energia necessária para evaporar a água durante a combustão e à redução da eficiência da queima devido à presença de umidade (HASAN, 2017).

Grau de Compactação e Aeração:

O grau de compactação e aeração dos resíduos em aterros e lixões influenciam o poder calorífico. Segundo Hasan (2017), materiais compactados ou sem acesso adequado ao oxigênio podem experimentar condições anaeróbicas, levando à produção de metano e reduzindo o poder calorífico, enquanto resíduos bem aerados podem favorecer condições aeróbicas e manter um poder calorífico mais elevado.

Presença de Resíduos Específicos:

A presença de resíduos específicos, como pneus, componentes eletrônicos, produtos químicos, solventes, óleos, materiais contaminados e outros materiais de composição complexa, pode influenciar significativamente o poder calorífico de aterros não controlados. A combustão desses materiais pode gerar diferentes quantidades de energia, emissões e impactos ambientais, requerendo atenção específica e gerenciamento adequado.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento desta monografia baseou-se em revisão bibliográfica e em dados de composição gravimétrica do Município de São Paulo, segundo as etapas:

- Seleção de artigos em bases de dados

Realização de buscas nas bases de dados Scielo, Pubmed e DeDalus com as palavras chave: “potencial calorífico” e “resíduo doméstico” e “resíduo e aterro”, com a localização de 781 estudos. Para critérios de inclusão foram selecionados estudos que abordem o potencial calorífico de resíduos sólidos domésticos ou potencial calorífico de resíduos de aterro, publicados entre os anos 2000 a 2023, em inglês ou português, em revistas indexadas.

- Determinação dos materiais que não tem reaproveitamento (reuso/reciclagem)

Com base na literatura, determinação de quais materiais componentes dos RSU são potenciais candidatos para aproveitamento energético

- Determinação do potencial calorífico dos resíduos

Com base na literatura, definição dos conceitos e métodos de determinação do potencial calorífico de materiais, assim como levantamento do potencial calorífico dos componentes dos RSU;

- Obtenção de dados de composição gravimétrica média de resíduos sólidos urbanos do Município de São Paulo, subprefeitura do Butantã

Através de relatórios quadrimestrais da empresa Loga, coletora do RSU da região, análise de dados de composição gravimétrica de RSU do município nos últimos anos e determinação da faixa de variação dos componentes;

- Avaliação do potencial energético dos RSU da região da Subprefeitura do Butantã, distrito de Vila Sônia

Com a composição gravimétrica média e faixas de variações dos componentes, mais a quantidade de RSU gerados anualmente, confrontadas com o potencial calorífico de materiais obtidos da literatura, estimativa do potencial energético dos RSU da região analisada.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

• Seleção de artigos em bases de dados

Após a análise dos requisitos através da leitura dos resumos dos trabalhos foram selecionados 25 estudos para compor este texto: BAŞARAN, 2022; BOSMANS, 2010; GARCIA, 2018; ERIKSSON, 2018; FUSS, 2022; GERAQUE, 2021; GOMES, 2017; HASAN, 2017; HONCHARUK, 2023; KAYABA, 2018; MOUTAZ, 2019; LEE, 2021; MOTGHARE, 2023; GALLO, 2014; OKAMURA, 2013; OLISA, 2018; ONOCHIE, 2023; PAPARI, 2021; ROSA, 2014; SAIANI, 2020; SANTOS, 2002; SAVEYN, 2016; SCHNABEL, 2021; SZIGETHY, 2020; SCHELLER, 2023.

• Determinação dos materiais e do potencial calorífico dos resíduos

Em números pode-se citar que o material mais reciclado no Brasil é o alumínio; estudos apontam que a taxa média de reaproveitamento do material descartado pelas residências gire em torno de 97%, inclusive o país é referência no tratamento da reciclagem de alumínio. Em segundo lugar vem o aço com 49% de reaproveitamento, com maior valor agregado ao resíduo, seguido de papel e vidro com, respectivamente, 47% e 45% de reaproveitamento. O material ainda subestimado é o PET, que aparece com 75% de reaproveitamento, porém estudos apontam que 45% do material é descartado indevidamente, principalmente ao mar, assim os números apresentados em relatórios podem ser errôneos. Na China, os materiais mais reciclados são plásticos (30%), metal (50%) e material eletrônico ou REEE (59%), esse último devido ao alto valor agregado do composto silício; não recicláveis são principalmente plásticos laminados.

Os materiais que não têm reaproveitamento para reuso e/ou reciclagem são espumas, esponjas de cozinha, embalagens metalizadas, isopor (por falta de tecnologia no processamento), lâmpadas, espelhos, vidros de óculos, vidros temperados, tubos de tv/monitores, louças, ampolas de remédios, tecidos e couro.

A revisão bibliográfica indicou que, entre esses componentes dos RSU que não têm reaproveitamento (reuso/reciclagem), os que são potenciais candidatos para aproveitamento energético, por terem maior poder calorífico, são: as embalagens acartonadas molhadas ou engorduradas; madeira, recortes de couro tratado de cintos e sapatos, e tecido.

O poder calorífico inferior de recortes de couro é de 4440 kcal/kg e de trapos de panos, 4200 kcal/kg (TECCALOR, 2020).

Para avaliar o poder calorífico inferior da madeira, considerou-se uma média dos valores da Tabela 1, obtendo-se 3.426 kcal/kg.

Tabela 1 – Poder calorífico de madeiras

Lascas de madeira	3.300 Kcal/kg
Lenha (40% água)	2.400 Kcal/kg
Lenha seca (12% água)	3.680 Kcal/kg
Madeira de caixotes	3.800 Kcal/kg
Madeira muito seca	4.800 Kcal/kg
Madeira pinho (seca ao ar)	3.500 Kcal/kg
Madeira verde	2.500 Kcal/kg

Fonte: TECCALOR,2020

O poder calorífico inferior de embalagens cartonadas, segundo Gomes (2017), é de 443 kJ/kg, ou seja, 106 kcal/kg.

Não se obtiveram dados de poder calorífico superior para os componentes individualmente. O poder calorífico inferior da matéria orgânica de RSU foi estimada como 6732 kJ/kg ou 1609 kcal/kg por GOMES (2017).

• Obtenção de dados de composição gravimétrica média de resíduos sólidos urbanos do Município de São Paulo, subprefeitura do Butantã

A empresa LOGA – Logística Ambiental de São Paulo S.A. é responsável pela coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos domiciliares e de saúde da Região Noroeste da cidade de São Paulo. A LOGA solicita à empresa Operator Assessoria e Análises Ambientais relatórios quadrimestrais com análises gravimétricas e físico-químicas das amostras dos resíduos domiciliares. São feitas análises dos RSU de 13 subprefeituras, dividindo as em setores, de acordo com seus distritos e organizando por períodos de acordo com a Tabela 2.

Após coleta pelas vias, os caminhões coletores dos setores selecionados chegam ao Transbordo Ponte Pequena, onde são pesados em balança, obtendo-se o peso bruto do conjunto (caminhão + lixo). Após a pesagem, os caminhões seguem para o pátio de descarga, onde descarregaram os resíduos em área devidamente reservada, conforme esquematizado na Figura 1.

Tabela 2 – Referência dos locais de coleta por setor, distrito e período de coleta dos RSU.

Subprefeitura	Setor	Distrito	Período
Butantã	BT 34	Vila Sônia	Noturno
Casa Verde/Cachoeirinha	CV 09	Casa Verde	Diurno
Freguesia/Brasilândia	FB 02	Freguesia do Ó	Diurno
Jaçanã/Tremembé	JT 03	Jaçanã	Diurno
Lapa	LA 17	Barra Funda	Noturno
Móoca	MO 24	Água Rasa	Diurno
Penha	PE 10	Vila Matilde	Diurno
Perus	PR 04	Anhanguera	Diurno
Pinheiros	PI 03	Pinheiros	Noturno
Pirituba/ Jaragua	PJ 05	Pirituba	Diurno
Santana/Tucuruvi	ST 19	Santana	Noturno
Sé	SE 28	Santa Cecília	Noturno
Vila Maria/Vila Guilherme	MG 29	Vila Medeiros	Noturno

Fonte: Loga, 2018.

Figura 1 – Esquematização do procedimento para análise da composição gravimétrica dos RSU.

Fonte: Loga, 2023.

Uma equipe de triagem formada por contratados de uma Cooperativa de Serviços da cidade de Cotia, equipada com os devidos EPI's (Equipamentos de Proteção Individual: botas, luvas, aventais e bonés), rasga todos os sacos de lixo. Em seguida, uma retroescavadeira revolve os resíduos já expostos até que o material se torne uma massa homogênea. Amostras são recolhidas em quatro pontos distintos da pilha homogeneizada e transferidas para caixas

plásticas (com pesos conhecidos) com aproximadamente 200 L de capacidade, as quais são pesadas em balança de precisão previamente aferida.

As caixas plásticas são esvaziadas sobre lonas estendidas sobre o pavimento, onde ocorre nova homogeneização. A pilha de resíduos é então separada em onze montes. Um dos montes é selecionado para extração da amostra para a análise físico-química em laboratório, a qual é embalada em saco plástico para não haver perda de umidade. Retira-se também uma pequena amostra para determinação da umidade em laboratório. No restante da pilha é feita a triagem dos resíduos separando, em diferentes recipientes, os seguintes materiais:

- Papel / papelão / jornal;
- Embalagem Longa Vida ('Tetra Pack');
- Embalagem PET;
- Isopor;
- Plástico Mole;
- Plástico Duro;
- Metais ferrosos;
- Pilhas e baterias;
- Vidros;
- Terra e pedra;
- Madeira;
- Trapos e panos;
- Alumínio;
- Borracha;
- Espuma;
- Matéria Orgânica;
- Fraldas / Papel Higiênico;
- Lixo Eletrônico;
- Diversos.

Cada material é pesado separadamente para obtenção da sua fração gravimétrica percentual na composição do lixo amostrado. Após a pesagem parcial de cada um dos recipientes, todo material é descartado e transportado pelas retroescavadeiras para o pátio de descarga normal de lixo do transbordo.

Uma amostra de aproximadamente 30 L é encaminhada para as análises físico-químicas. Inicialmente removem-se interferentes - materiais tais como pedras, vidros, latas e outros que

impossibilitam uma boa homogeneização mecânica da amostra. A remoção é feita através de catação manual. A amostra é então homogeneizada com auxílio de triturador dotado de facas e martelos, além de uma peneira que reduz o tamanho das partículas para diâmetros em torno de 1 a 2 cm, proporcionando frações de amostra de aspecto e textura razoavelmente homogêneas.

As análises realizadas em laboratório seguem o método *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, normas da ABNT e EPA. São elas:

- Avaliação da umidade: secagem em estufa a 105°C;
- pH: Método potenciométrico;
- Cinzas e Matéria Orgânica: método da queima em mufla a 550°C e 670°C;
- Cádmio, cálcio, chumbo, cobre, cromo total, fósforo, manganês, mercúrio, níquel, potássio e zinco: digestão ácida, leitura em espectrofotômetro de absorção atômica;
- Carbono, hidrogênio e nitrogênio: análise elementar de CHN;
- Poder Calorífico Inferior e Superior

Para a análise do presente estudo foi selecionado o setor BT – Subprefeitura do Butantã, no distrito de Vila Sônia. Trata-se de setor de classe social média, de ocupação predominantemente residencial e média densidade populacional.

Foram analisadas tabelas de dados de 2018 a 2023, compreendendo os relatórios gravimétricos do período de 42º ao 56º quadrimestre de documentação fornecida pela empresa. Os arquivos dos relatórios dos 46º, 49º e 53º quadrimestres apresentaram-se corrompidos, impossibilitando a abertura; o 52º relatório era composto somente de mapas e rotas de coleta, sem dados quantitativos e qualitativos de coleta de material. Esses 4 arquivos foram descartados da análise. Foram analisadas no total 11 amostras.

Na Tabela 3 está a composição gravimétrica de todas as amostras, além da média, desvio-padrão e coeficiente de variação de cada componente. Os Gráficos 1 a 3 mostram a variação temporal da fração de cada componente ao longo de 11 quadrimestres.

Tabela 3 – Composição gravimétrica das amostras do 42º ao 56º Quadrimestres.

Material	BT-34	BT – 36	BT-05	BT-45	BT-38	BT-21	BT-45	BT-10	BT-12	BT-6	BT-32			
	42º Quadrimestre	43º Quadrimestre	44º Quadrimestre	45º Quadrimestre	47º Quadrimestre	48º Quadrimestre	50º Quadrimestre	51º Quadrimestre	54º Quadrimestre	55º Quadrimestre	56º Quadrimestre	Média	Desvio padrão	Cv
Matéria orgânica	60,61	56,59	56,85	53,44	61,79	56,67	61,61	40,43	23,68	47,12	45,76	51,32	11,51	22
Papel, Papelão e Jornal	9,72	10,55	8,13	11,04	8,84	7,13	8,09	7,49	14,19	5,14	9,67	9,09	2,38	26
Embalagem longa vida	0,35	0,4	1,06	0,98	0,66	0,7	0,53	0,72	0	0,92	1,18	0,68	0,35	51
Embalagem Pet	0,61	0,58	1,63	1,92	0,97	0,7	0,61	1	2,9	1,88	2,81	1,42	0,87	61
Isopor	0,26	0,27	0,31	0,54	0,62	0,62	0,86	0,36	0,89	0,72	0,89	0,58	0,25	43
Plástico Mole	7,49	9,88	8,92	9,92	10,6	9,29	6,45	8,01	31,06	16,1	11,12	11,71	6,89	59
Plástico Duro	3,14	6,32	5,3	4,74	4	4,45	4,94	6,04	3,39	3,34	3,9	4,51	1,08	24
Metais ferrosos	0,78	0,98	0,84	0,85	0,84	1,41	0,55	0,25	1,16	0,36	0,64	0,79	0,34	43
Pilhas e Baterias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0
Vidros	2,66	1,69	2,47	4,6	1,89	4,05	2,12	1,22	2,32	2,4	2,86	2,57	0,99	38
Terra e Pedra	0	0	0	0	0	3,92	0	10,28	0	3,12	2,59	1,81	3,19	176
Madeira	0	0	4,9	3,44	3,12	0	0	5,91	2,95	1,75	0,69	2,07	2,14	103
Trapos e panos	2,7	5,74	3,36	2,5	0	3,87	3,09	8,65	7,63	1,28	2,17	3,73	2,63	70
Diversos	0	0	0	0	0,35	0	0	0	0	3,59	0	0,36	1,08	301
Alumínio	0,26	0,22	0,4	0,49	0,4	0,35	0,4	0,57	0,71	0,7	1,23	0,52	0,28	54
Borracha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18	0,49	0,06	0,15	250
Fraldas/Papel Higiênico	8,06	6,1	4,99	5,54	4,93	5,99	7,55	5,93	5,89	9,28	12,9	7,01	2,37	34
Espuma	0	0	0	0	0	0	0,11	0	0	0,13	0,15	0,04	0,06	173
Lixo Eletrônico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09	0,07	0,01	0,03	225
SubTotal	96,64	99,32	99,16	100	99,01	99,15	96,91	96,86	96,77	98,1	99,12	98,28	1,25	1
Perdas no Processo	3,36	0,68	0,84	0	0,99	0,85	3,09	3,14	3,23	1,9	0,88	1,72	1,25	73

42º quadrimestre julho, agosto, setembro, outubro – 2018 CL-NO-10/18, 2018.
 43º quadrimestre novembro, dezembro 2018; janeiro; fevereiro 2019. CL-NO-02/19. 2019A^a.
 44º quadrimestre: março, abril, maio, junho - 2019CL-NO-06/19. 2019B.
 45º quadrimestre julho, agosto, setembro, outubro – 2019 CL-NO-10/19. 2019C.
 47º quadrimestre: março, abril, maio, junho – 2020 . CL-NO-06/20. 2020A
 48º quadrimestre julho, agosto, setembro, outubro – 2020 CL-NO-10/20. 2020 A.
 50º quadrimestre: março, abril, maio, junho – 2021.CL-NO-06/21. 2021A .
 51º quadrimestre: julho, agosto, setembro, outubro – 2021 CL-NO-10/21. 2021B.
 54º quadrimestre: julho, agosto, setembro, outubro CL-NO-11/22. 2022
 55º quadrimestre novembro, dezembro 2022; janeiro; fevereiro 2023. CL-NO – 02/23.2023A.
 56º quadrimestre: março, abril, maio, junho CL-NO – 06/23. 2023B.

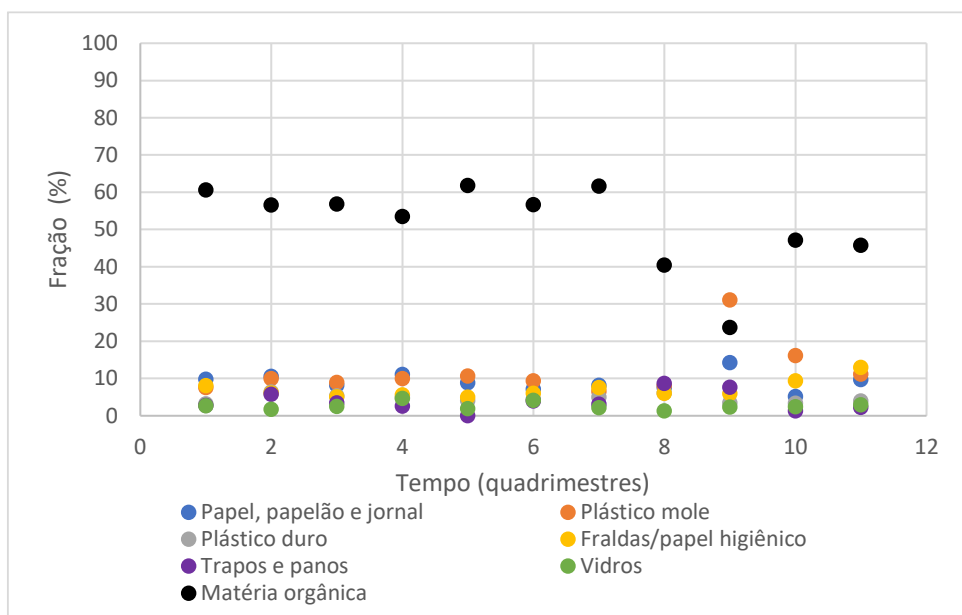
C_v = coeficiente de variação = desvio padrão/média

Fonte: LOGA, 2018; LOGA, 2019A; LOGA, 2019B, LOGA, 2019C, LOGA, 2020 A, LOGA, 2021A, LOGA2021B, LOGA 2022, LOGA 2023A; 2023B

.

A Tabela 3 mostra que não há pilhas e baterias entre os resíduos coletados, obedecendo a Resolução Conama 401/08. Alguns componentes aparecem em poucas amostras e em pequena quantidade: borracha, espuma, lixo eletrônico e diversos, sendo que ocorreram borracha, espuma e lixo eletrônico nos dois últimos quadrimestres. Madeira, terra e pedra não foram detectadas em alguns quadrimestres, e em outros aparecem em porcentagens significativas (terra e pedra não aparecem em 7 amostras e em uma, a fração atinge 10,3% em massa). A matéria orgânica tem média 51,3%, ligeiramente maior do que a média nacional (45,3% segundo o SINIR, 2020).

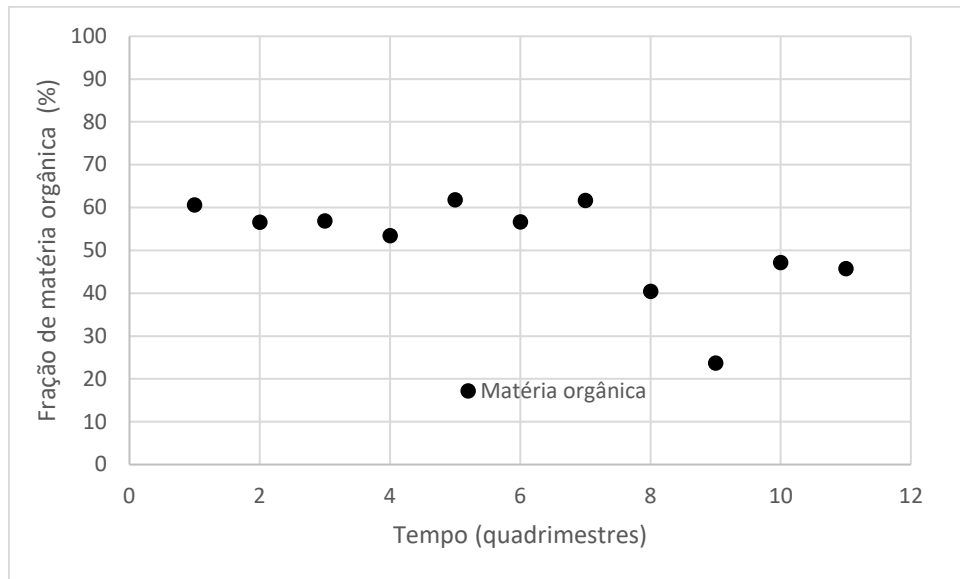
Gráfico 1 – Variação temporal das frações dos componentes majoritários.



Fonte: Autora, 2024.

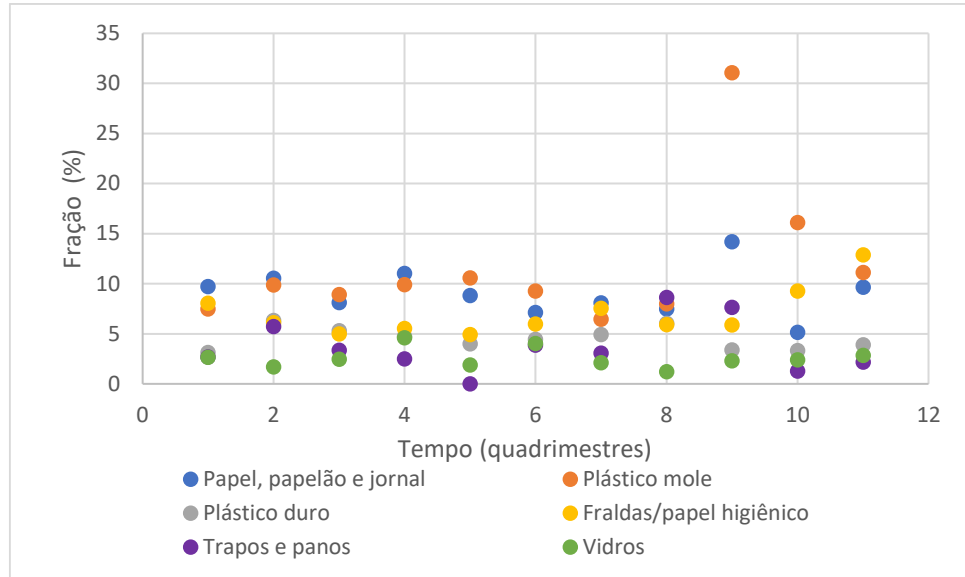
A matéria orgânica, segundo Bosmans (2010) apresenta numericamente maior potencial calorífico, 8.492 kcal/g o que representa maior energia liberada na queima da amostra. A matéria orgânica pode ser reaproveitada por compostagem, por pirólise ou ainda por combustão, sendo um dos principais componentes que fornecem energia no processo de queima. Tal fato explica porque os PCI e PCS das amostras são maiores em comparação a PCI e PCS dos materiais não reutilizáveis/ recicláveis em separado. Fica assim a reflexão da importância entre escolher a compostagem como forma de aproveitamento do material orgânico ou do seu aproveitamento em reações químicas para extração de energia elétrica.

Gráfico 2 – Variação temporal da fração de matéria orgânica em relação ao total do RSU.



Fonte: Autora, 2024.

Gráfico 3 – Variação temporal das frações de papel, plásticos, trapos, fraldas e vidros.



Fonte: Autora, 2024.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados das análises físico-químicas. O Gráfico 4 apresenta a variação temporal do pH. O meio ácido favorece a extração de energia pelo processo de combustão, enquanto o meio alcalino dificulta o início da queima. Uma explicação é que o meio ácido, por ter mais fonte de hidrogênio, facilita o processo de combustão ou ainda o

processo de pirólise pode ser facilitado (MONTAZ, 2019). Os dados apresentam que as amostras são em sua maioria ácidas, com pH em torno de 6, sendo 2 amostras neutras e 1 levemente alcalina.

O teor de carbono influencia na queima, uma vez que o carbono fixo queima de forma mais lenta, sendo necessário maior tempo e demanda de energia para a queima completa do material na câmara de combustão.

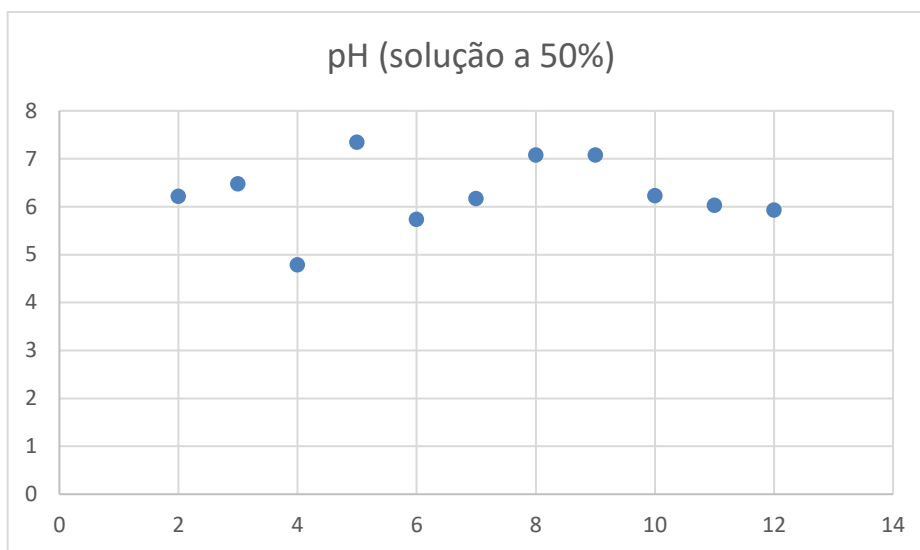
As amostras analisadas apresentaram pelo menos 50% de umidade, exceto as amostras dos 45º, 47º e 48º quadrimestres (respectivamente 32,2%, 23,2% e 31,0%). A umidade retarda o processo de energia e gasta energia para consumir a água. A umidade é um fator que pode ser de influência climática.

As amostras do 47º quadrimestre ao 54º quadrimestre apresentaram acima de 20% em cinzas.

Tabela 4 – Análise físico-química das amostras do 42° ao 56° Quadrimestres.

Parâmetros	Unidade	BT 34	BT-36	BT- 05	BT- 45	BT-38	BT-21	BT-45	BT-10	BT-12	BT-06	BT-32
		42° Quadrimestre	43° Quadrimestre	44° Quadrimestre	45° Quadrimestre	47° Quadrimestre	48° Quadrimestre	50° Quadrimestre	51° Quadrimestre	54° Quadrimestre	55° Quadrimestre	56° Quadrimestre
Umidade a 105°C	%	58,69	58	64,02	32,18	23,2	30,97	66,23	66,23	71,43	59,8	46,67
pH (solução a 50%)		6,22	6,48	4,79	7,35	5,74	6,17	7,08	7,08	6,23	6,03	5,93
Cinzas a 550°C	%	14,61	15	6,68	12,6	20,84	26,61	23,05	23,05	27,79	8,71	14,11
Cinzas a 670°C	%	9,23	15	4,93	11,67	19,93	25,86	20,79	20,79	25,96	7,51	14,11
Cádmio	mg/kg	5,31	966,12	0,1	0,39	< 0,10	<0,10	0,16	0,16	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Chumbo	mg/kg	4,25	82,49	1,6	<1,60	< 1,60	< 1,60	21,1	21,1	3,26	7,31	1,92
Cobre	mg/kg	47,48	580,14	12,41	13,82	5629,41	63,62	84,97	84,97	20,13	40,05	20,12
Cromo	mg/kg	39,91	49,66	25,37	18,1	21,06	42,74	66,53	66,53	21,65	20,93	3,94
Manganês	mg/kg	160,37	261,79	252,97	67,06	25,03	64,51	83,18	83,18	54,04	148,35	91,83
Mercúrio	mg/kg	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	< 0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Níquel	mg/kg	215,83	52,89	51,58	41,41	32,82	70,01	130,03	130,03	52,15	17,95	20,63
Zinco	mg/kg	124,56	1998,38	101,17	57,42	52,92	41,04	123,12	123,12	67,38	109,82	27,31
Potássio	mg/kg	30.129,76	7.606,88	13.218,02	2.684,94	1162,86	3114,78	22704,17	22704,17	4161,38	11980,06	2911,75
Fósforo	mg/kg	4570,34	6120,38	2751,68	733,44	8762,48	395,3	4439,76	4439,76	1094,7	7740,37	2007,08
Enxofre	%	0,06	0,01	<0,01	0,018	0,045	0,014	0,105	0,105	0,075	0,19	0,193
Nitrogênio	%	6,64	<0,10	<0,10	<0,10	< 0,0017	<0,0017	0,829	0,829	816,44	0,1	0,0062
Hidrogênio	%	8,01	6,28	7,66	5,86	6,06	6,62	7,84	7,84	5,56	5,12	4,85
Carbono	%	36,65	41,47	48,18	41,08	42,96	41,87	48,23	48,23	39,48	35,78	48,5
Poder Calorífico Inferior (PCI)	kcal/g	798	1840	1510	2175	4680	2671	1211	1211	4503	1120	6447
Poder Calorífico Superior (PCS)	kcal/g	4225	5074	5636	3671	6404	4312	5116	5116	4509	3927	6447
Sólidos Secos a 105°C	%	41,31	42	35,98	67,82	76,8						
Densidade Aparente	g/cm³	<10,13	<10,13	<10,13	<10,13	< 10,13	< 10,33	< 10,13	< 10,13	0,25	0,29	0,68
Matéria Orgânica	%	40,68	86,99	95,72	91,46	80,12	74,23	79,55	79,55	73,62	92,84	86,38
Oxigênio	%	51,06	51,56	56,91	28,6	20,62	27,53	8,87	58,87			

Fonte: LOGA, 2018; LOGA, 2019A; LOGA, 2019B, LOGA, 2019C, LOGA, 2020 A, LOGA, 2021A, LOGA2021B, LOGA 2022, LOGA 2023A; 2023B

Gráfico 04 – pH das amostras.

Fonte: Autora, 2024.

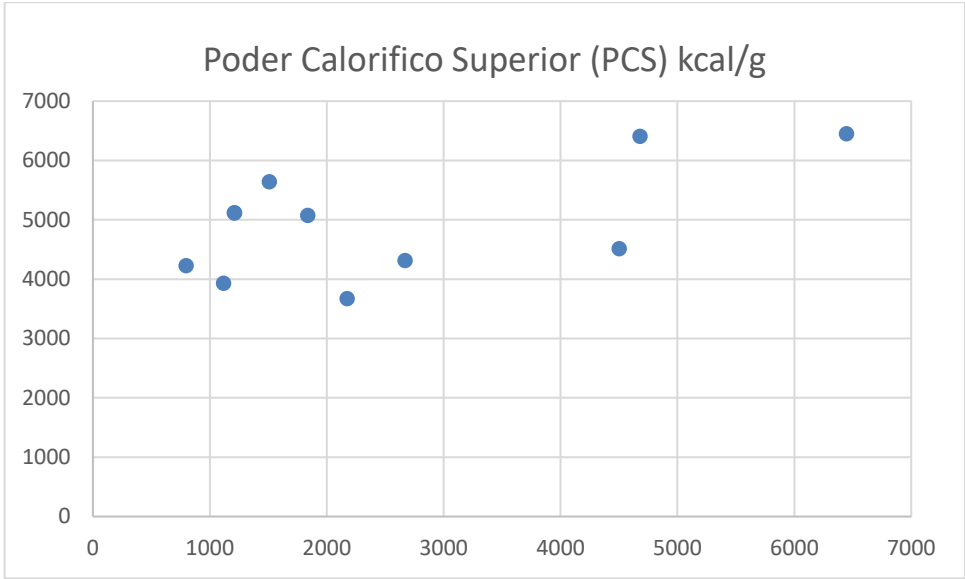
- Avaliação do potencial energético dos RSU da região da Subprefeitura do Butantã, distrito de Vila Sônia

A Tabela 4 mostra que os RSU da Subprefeitura de Butantã, distrito de vila Sonia, possuem PCS e PCI semelhantes aos da cidade de Ponta Grossa, PR (GOMES, 2017) e mais altos do que os RSU da Malásia, China e Espanha (BASARAN, 2022). O PCS da amostra de Ponta Grossa variou de 4.571 a 5.033 kcal/kg com PCS médio de 4.734 kcal/kg. O PCS dos resíduos da Malásia estiveram entre 1.501 e 2.392 kcal/kg, na China 1.195 kcal/kg e Norte da Espanha 2.656 kcal/kg. Vale ressaltar que China e Espanha já utilizam energia proveniente de RSU.

As amostras com maiores potenciais são as amostras do 47º quadrimestre, com PCI 4.680 kcal/kg e PCS 6.404 kcal/kg; a amostra do 54º quadrimestre, com PCI 4.503 kcal/kg e PCS 4.509 kcal/kg; e a 56º amostra com PCI 6.447 kcal/kg e PCS 6.447 kcal/kg.

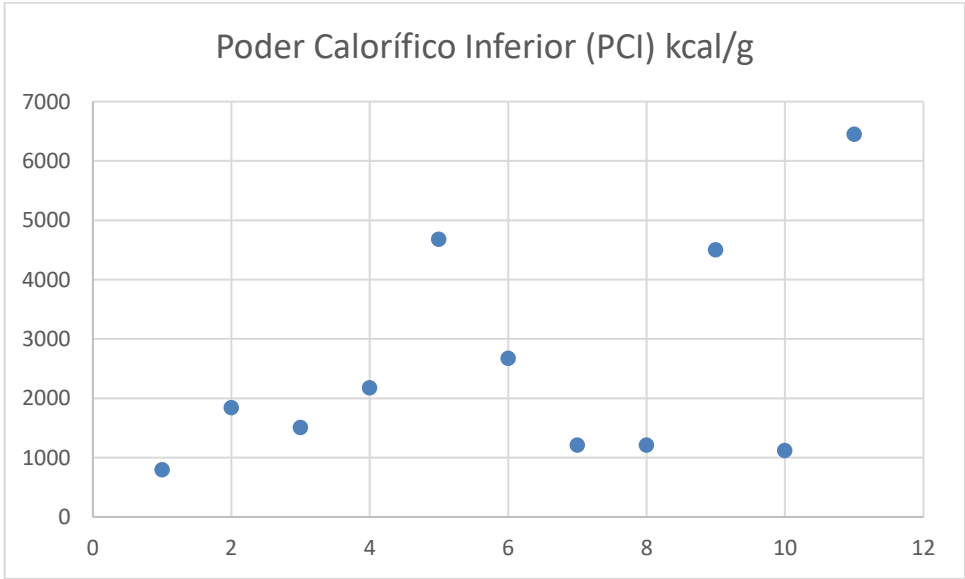
Os Gráficos 5 e 6 mostram a variação temporal do PCS e do PCI, respectivamente. Os Gráficos 7 e 8 apresentam o PCS e o PCI em função do teor de carbono e da matéria orgânica, respectivamente. As baixas correlações, ou seja, menores do que 0,9, mostram que não é simples a previsão do poder calorífico a partir da composição gravimétrica, pois a influência de cada componente é complexa.

Gráfico 05 – Variação do PCS das amostras segundo os relatórios da LOGA.

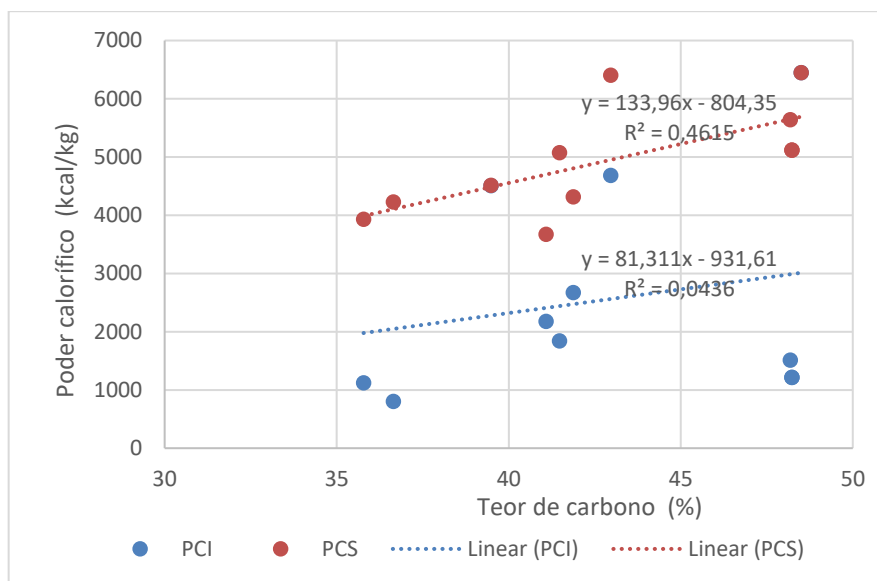


Fonte: Autora, 2024.

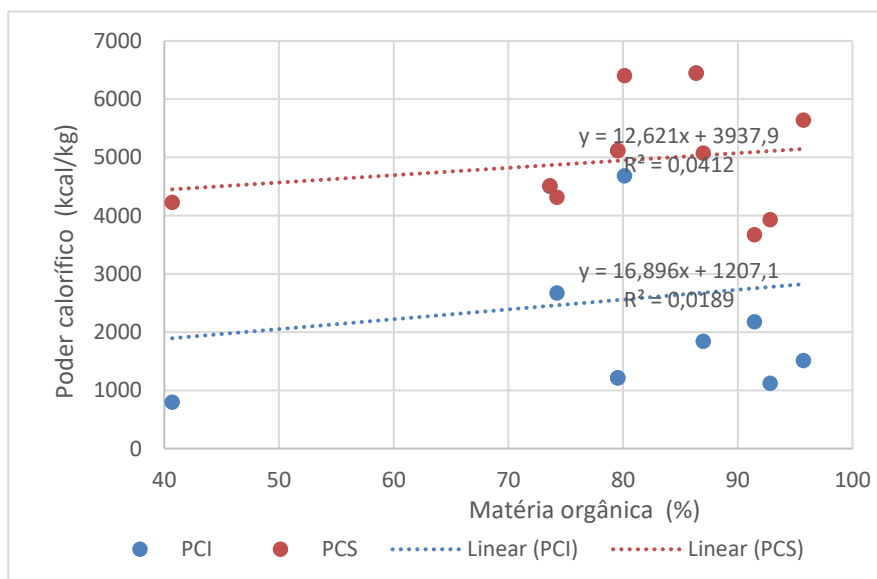
Gráfico 06 – Variação temporal do PCI das amostras segundo os relatórios da LOGA.



Fonte: Autora, 2024.

Gráfico 07 – Poder calorífico em função do teor de carbono

Fonte: Autora, 2024.

Gráfico 08 - Poder calorífico em função do teor de matéria orgânica.

Fonte: Autora, 2024.

Considerando os componentes indicados pela revisão bibliográfica como candidatos potenciais para extração de energia (embalagens, couro, madeira e tecido):

- Embalagens PET e Longa Vida, com médias de, respectivamente, 1,42% e 0,68% e desvio-padrão de, respectivamente, 0,87% e 0,35%.
- Couro não aparece como um componente isolado, provavelmente estando incluso na categoria “diversos”.

- Madeira não foi detectada em 4 quadrimestres, e nos demais variou entre 0,69% e 5,91%, com média de 2,07% e desvio-padrão de 2,14%.

- Trapos e panos variaram entre 0% e 8,65%, com média 3,73% e desvio-padrão de 2,63%.

A Tabela 5 mostra a estimativa do poder calorífico inferior contido em 1 kg de RSU da Vila Sônia apenas com os componentes selecionados, ou seja, não recicláveis e não reaproveitáveis. Para a estimativa consideraram-se os valores médios das frações gravimétricas de cada componente. Utilizou-se o PCI por falta de dados de PCS, conforme citado anteriormente.

Tabela 05 - Estimativa de PCI em 1 kg de RSU.

Componente	Fração (%)	Massa em 1 kg de RSU (kg)	Poder calorífico unitário (kcal/kg)	Poder calorífico de 1 kg de RSU (kcal/kg)
Embalagens PET	1,42±0,87	0,0142	106	1,50
Embalagens Longa Vida	0,68±0,35	0,0068	106	0,72
Couro	-		4440	
Madeira	2,07±2,14	0,0207	3426	70,91
Trapos e panos	3,73±2,73	0,0373	4200	156,66
Total				229,80

Fonte: Autora, 2024.

O valor contido de poder calorífico inferior em 1 kg de RSU considerando-se apenas os componentes de embalagens PET e longa vida, couro, madeira, trapos e panos resulta em u 229,8 kcal/kg. Este valor é muito inferior ao da Tabela 4 (média), porque nesta foram feitos ensaios de calorimetria em laboratório com amostra total. Para ser viável o aproveitamento energético dos RSU, só essas frações não seriam suficientes ou seria necessário um grande volume dessas frações para viabilizar a construção de caldeiras. Levando-se em consideração que as amostras coletadas têm alta porcentagem de materiais recicláveis e material orgânico, pode-se refletir se vale a pena fazer a separação dos materiais não reutilizáveis para seu reaproveitamento energético.

8. CONCLUSÃO

A partir da realização deste estudo pode-se concluir que os materiais que não têm reaproveitamento para reuso/reciclagem e compostagem, e que ao mesmo tempo têm potencial

energético são embalagens acartonadas, couro de cintos e sapatos, panos e trapos, e lascas de madeira. No caso dos RSU do Distrito de Butantã, como esses componentes se apresentam em frações muito baixas, a quantidade de energia a ser extraída desses materiais é pequena: para cada 1 kg de RSU, obtêm-se 229,80 kcal/kg de poder calorífico inferior. Já para as amostras completas de RSU que foram submetidas a ensaios de calorimetria, o poder calorífico inferior variou de 799 a 6447 kcal/kg, enquanto o poder calorífico superior variou de 3671 a 6447 kcal/kg.

Também se constatou que não é possível fazer boa previsão do poder calorífico a partir da composição gravimétrica, pois os RSU são formados por muitos componentes distintos e também condições físico-químicas muito variáveis, assim a influência de cada componente é complexa.

Os RSU do Distrito de Butantã são compostos em média de 51,32% de matéria orgânica, 11,51% de plástico mole e 4,71% de plástico duro, além de 9,09% de papel e papelão. Dada a dificuldade de reciclar plásticos e realizar a compostagem da matéria orgânica dos RSU, fica a reflexão se vale a pena incinerar apenas a pequena quantidade de inservíveis com potencial de combustão, ou incinerar a amostra para geração de energia sem realizar a separação de material orgânico, plásticos e papéis/papelões.

Ressalta-se que mais estudos sobre o tema são necessários para que se possa esclarecer alguns pontos não encontrados ou pouco explorados na literatura, como o poder calorífico de alguns materiais, assim como obter mais dados sobre a tecnologia do aproveitamento energético dos RSU.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA SENADO. Aprovado incentivo ao aproveitamento de lixo para produção de energia. 07, dezembro de 2022. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2022/12/07/aprovado-incentivo-ao-aproveitamento-de-lixo-para-producao-de-energia>. Acesso em 16 de janeiro de 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419/1992. Dispõe sobre as normas técnicas para implantação de Aterro Sanitário. Disponível em: < <https://www.observatorioderesiduos.unb.br/painel/assets/uploads/files/996de-nbr-8.419-nb-843->

apresentacao-de-projetos-de-aterros-sanitarios-rsu.pdf>. Acesso em 05 fevereiro 2024

BAŞARAN, A. A study on the renewable energy potential of incineration of municipal solid wastes produced in Izmir province. **International Advanced Researches and Engineering Journal**, v. 6, n. 2, p. 123-131, 2022.

BRASIL. Ministério Meio Ambiente. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/perguntas-frequentes-acesso.html?catid=0&start=80> Acesso em 18 de janeiro de 2024.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/31f54f69-3a90-4daf-b748-932a45c7695a/Boscov_2008_Geotecnia.pdf. Acesso em: 03 fevereiro . 2024

BOSMANS, A, *et al.* Energy from waste: Review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment. Venice 2010, **Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste**, 2010.

CETESB. Logística Reversa, ações. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/logisticareversa/glossario/acoes/#:~:text=Disposi%C3%A7%C3%A3o%20Final%20Ambientalmente%20Adequada%3A%20distribui%C3%A7%C3%A3o,Lei%20n%C2%BA%2012.305%2F2010>). Acesso em 10 de janeiro de 2024.

CETESB. Licenciamento de resíduos sólidos. 2013. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2013/12/licenciamento_residuos_solidos.pdf Acesso em 10 de janeiro de 2024.

GARCIA, M.L.F. et al. Waste management towards circular economy: a case study of haidian district, beijing, China. Master of enviromental and energy management. 2018.

ERIKSSON, O., et al. Energy Recovery from Waste Incineration—The Importance of Technology Data and System Boundaries on CO2 Emissions. **Energies** n^o10, p:539- 570, 2017.

EUROSTAT., Archive: Estatísticas sobre resíduos. 2022 Disponível em:

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/pt&oldid=88042 Acesso em 05 de Janeiro de 2024.

FERREIRA, E., et al. Comparative analysis of waste-to-energy alternatives for a low-capacity power plant in Brazil. **Waste Management & Research** v. 36, nº 3, p: 247–258, 2018.

FUSS, M. et al. Sustainable options to improve household solid waste management of Belo Horizonte, Brazil. Faculty of Humanities and Social Sciences of the Karlsruhe Institute of Technology. 2022

GERAQUE, Eduardo. Energia vem do lixo: tecnologias transformam resíduos em biogás. Estado de São Paulo, São Paulo, 24, novembro 2021. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/sustentabilidade/energia-vem-do-lixo-tecnologias-transformam-residuos-em-biogas/> acesso em 05 de janeiro de 2024.

GOMES, S. et al. Energy potencial of household solid waste (HSW) in the city of Ponta Grossa, Paraná, Brazil. **Eng Sanit Ambient** v.22, n.6, p: 1197-1202, 2017.

HASAN, E.S. et al. Proximate and The Calorific Value Analysis of Brown Coal for High-Calorie Hybrid Briquette Application. **Journal of Physics: Physics** v 846, p:23–25, 2017.

HONCHARUK, I. et al. Bioenergy recycling of household solid waste as a direction for ensuring sustainable development of rural áreas. Polityka energetyczna – **Energy Policy Journal**. v26, p: 23–42;2023.

KAYABA H. et al. Characterization and Potential Recovery of Household Solid Waste in the City of Ouagadougou (Burkina Faso). **Journal of Environmental Protection**, v.9, p:309-324, 2018,

MOUTAZ B., et al. The Hydrogen Energy Potential of Solid Waste:A Case Study of Misrata City. **Advances in Biological Chemistry**, nº9, p:45-53, 2019.

LEE, R. P. et al. Perception of chemical recycling and its role in the transition towards a circular carbon economy: A case study in Germany. **Waste Management** v.125, p: 280–292, 2021.

Lei Federal nº 12.305/2010 - Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos - Prefeitura da Cidade de São Paulo. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/comunicacao/cuide_da_cidade/noticias/?p=276251#:~:text=No%20ano%20de%202010%2C%20a,p%C3%BAblico%20e%20os%20instrumentos%20econ%C3%B4micos acesso em 05/01/2024.

LOGA. Relatório de caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 42º quadrimestre julho, agosto, setembro, outubro – 2018. CL-NO-10/18, 2018.

LOGA. Relatório de caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 43º quadrimestre novembro, dezembro 2018; janeiro; fevereiro 2019. CL-NO-02/19. 2019 A.

LOGA. Relatório de caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 44º quadrimestre: março, abril, maio, junho - 2019 CL-NO-06/19. 2019B.

LOGA. Relatório de caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 45º quadrimestre julho, agosto, setembro, outubro – 2019. CL-NO-10/19. 2019C.

LOGA. Relatório de caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 47º quadrimestre: março, abril, maio, junho – 2020. CL-NO-06/20. 2020A

LOGA. Relatório de caracterização o dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 48º OUTUBRO quadrimestre julho, agosto, setembro, outubro – 2020 CL-NO-10/20. 2020 A.

LOGA. Relatório de caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 50º quadrimestre: março, abril, maio, junho – 2021. CL-NO-06/21. 2021A .

LOGA. Relatório de caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 51º quadrimestre: julho, agosto, setembro, outubro – 2021 CL-NO-10/21. 2021B.

LOGA. Relatório de Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 54º quadrimestre: julho, agosto, setembro, outubro CL-NO-11/22. 2022

LOGA. Relatório de Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 55º quadrimestre novembro, dezembro 2022; janeiro; fevereiro 2023. CL-NO – 02/23.2023A .

LOGA. Relatório de Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Paulo. Agrupamento noroeste – 56º quadrimestre: março, abril, maio, junho CL-NO – 06/23

Ministério de minas e energia - NOTA TÉCNICA DEA 18/14 Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos – Rio de Janeiro 2024

MOTGHARE, K.A., et al. Comparative study of different waste biomass for energy application. **Waste Management**. 2015.

SONIL, N. et al. Perspectives on Thermochemical Recycling of End-of-Life PlasticWastes to Alternative Fuels. **Materials** v.16, p:4563, 2023.

GALLO, C.N. O combustível que vem do lixo. Campinas, 26 de maio a 1º de junho de 2014

OKAMURA, L.A. Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.109 f. 2013.

OLISA, Y.P. et al.Gross Calorific Value of Combustible Solid Waste in a Mass Burn Incineration Plant, Benin City, Nigeria J. **Appl. Sci. Environ. Manage**, v. 22, nº9, p: 1377–1380, 2018.

ONOCHIE, U.P. et al. Potentials of Biomass Waste Resources with Respect to their Calorific Value, Proximate and Ultimate Analysis for Energy Utilization IOP Conf. Ser.: **Earth Environ. Sci**. v. 1178, 2023.

PRATAMA, R. et al. Study of increasing the calorific value of coal using waste cooking oil. Disponível em: , v. 1134

PAPARI, S. et al. Pyrolytic Conversion of Plastic Waste to Value-Added Products and Fuels: A Review. **Materials** v. 14, 2021.

ROSA, P. Conversão à baixa temperatura é alternativa sustentável para reaproveitamento de resíduos sólidos. **Revista UFF** nº 5. Disponível em: <https://www.noticias.uff.br/revistauff/2014/05/pagina-02.php>
Acesso em 02 novembro 2023.

SAIANI, CC. MENDONÇA, RS. KUWAHARA, MY. Efeitos da disposição ambientalmente adequada dos resíduos sólidos sobre a saúde em municípios brasileiros. Planejamento e políticas públicas, nº 55,p: 229 – 269, 2020.

SANTOS, G.T. Energia que vem do lixo. Monografia. Faculdade de Ciências da Saúde do Centro Universitário de Brasília. 2002.

SAVEYN, H. et al. Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy. **JRC Science for policy report – European Comission**,2016.

SCHNABEL., K. et al. Full-scale accelerated carbonation of waste incinerator bottom ash under continuous-feed conditions. **Waste Management** n. 125, p: 40–48. 2021.

SZIGETHY, L. ANTENOR, S. Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. IPEA. 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em 05/01/2024.

SHELLER, João. Startup reutiliza até papel higiênico e bitucas para produzir energia e reduzir lixo em aterros. Estado de São Paulo, São Paulo, 09, março 2023. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/pme/startup-reutiliza-ate-papel-higienico-e-bitucas-para-produzir-energia-e-reduzir-lixo-em-aterros/> Acesso em 10 de janeiro de 2024.

TEC Tecnologia em calor – Tabela de potencial calorífico inferior dos materiais. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.ecoverden.com.br/files/tabelaPotencialCalorificoGrifado.pdf](http://www.ecoverden.com.br/files/tabelaPotencialCalorificoGrifado.pdf) . Acesso em 02/03/2024.

ANEXO I – Tabela demonstrativa de poder calorífico inferior de materiais.

TABELA - PODER CALORÍFICO INFERIOR

COMBUSTÍVEL	PCI	COMBUSTÍVEL	PCI
Álcool de cana	5.500 Kcal/l	Gás natural	8.600 Kcal/m ³
Aparas vinilo	6.300 Kcal/kg	Lascas de madeira	3.300 Kcal/kg
Bagaço de cana (20% água)	3.200 Kcal/kg	Lenha (40% água)	2.400 Kcal/kg
Bagaço de cana (50% água)	1.800 Kcal/kg	Lenha seca (12% água)	3.680 Kcal/kg
Bambú (10% água)	3.700 Kcal/kg	Madeira de caixotes	3.800 Kcal/kg
Borra de café	1.570 Kcal/kg	Madeira muito seca	4.800 Kcal/kg
Carvão de babaú	7.000 Kcal/kg	Madeira pinho (seca ao ar)	3.500 Kcal/kg
Carvão mineral - Cambui/PR	6.200 Kcal/kg	Madeira verde	2.500 Kcal/kg
Carvão mineral - Charqueadas/RS	3.100 Kcal/kg	Óleo combustível 1 ^A	9.800 Kcal/kg
Carvão mineral - Mina do Leão/RS	4.200 Kcal/kg	Óleo combustível 1 ^B	9.800 Kcal/kg
Carvão mineral - Tubarão/SC	4.500 Kcal/kg	Óleo combustível 2 ^A	9.000 Kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 Kcal/kg	Óleo combustível 2 ^B	9.000 Kcal/kg
Casca de árvore	2.200 Kcal/kg	Óleo combustível 3 ^A	3.000 Kcal/kg
Casca de algodão	3.000 Kcal/kg	Óleo combustível 3 ^B	9.000 Kcal/kg
Casca de amêndoa dende	4.800 Kcal/kg	Óleo de algodão	8.050 Kcal/l
Casca de arroz (20% água)	3.300 Kcal/kg	Óleo de amendoim	8.000 Kcal/l
Casca de babaçu	4.000 Kcal/kg	Óleo de babaçu	7.770 Kcal/l
Casca de cacau (8% água)	3.900 Kcal/kg	Óleo de soja	8.125 Kcal/l
Casca de café	3.800 Kcal/kg	Óleo diesel	8.620 Kcal/l
Casca de cajú	4.700 Kcal/kg	Palha de amendoim (12% água)	3.100 Kcal/kg
Casca de côco	4.000 Kcal/kg	Palha de trigo (20% água)	3.200 Kcal/kg
Casca de eucalipto	3.750 Kcal/kg	Papel	4.200 Kcal/kg
Casca de tanino úmido (68% água)	800 Kcal/kg	Piche alcatrão	8.600 Kcal/kg
Casca de soja	3.300 Kcal/kg	Pó de linho	4.000 Kcal/kg
Cavaco (eucalipto)	4.300 Kcal/kg	Pó de madeira fino (seco)	4.000 Kcal/kg
Cavacos de pinho	2.500 Kcal/kg	Pó de madeira grosso (seco)	4.200 Kcal/kg
Coque de gás	5.400 Kcal/kg	Pó de tabaco	2.300 Kcal/kg
coque de lenha	7.600 Kcal/kg	Querosene	8.300 Kcal/l
Coque metalúrgico	7.200 Kcal/kg	Recortes de couro (14% água)	4.400 Kcal/kg
Fibras de palmeira (48% água)	2.000 Kcal/kg	Resíduos de juta	3.800 Kcal/kg
Fibras de palmito	3.800 Kcal/kg	Restos de borracha	4.000 Kcal/kg
Filme polietileno	5.600 Kcal/KG	Sementes de girassol (9,5% água)	4.300 Kcal/kg
Gás de água	4.000 Kcal/m ³	Serragem de pinho (40% água)	2.000 Kcal/kg
Gás de água carburetado	6.000 Kcal/m ³	Serragem seca (20% água)	3.500 Kcal/kg
Gás de alto forno	700 Kcal/m ³	Serragem + Cepilho (seco)	4.600 Kcal/kg
Gás de biodigestor (biogás)	5.000 Kcal/m ³	Sisal (11% água)	3.400 Kcal/kg
Gás de coqueira	4.300 Kcal/m ³	Sobra de serraria (pinho)	4.160 Kcal/kg
Gás de gasogênio	1.260 Kcal/m ³	Tecido nailon	7.300 Kcal/kg
Gás de nafta	4.750 Kcal/m ³	Trapos de pano	4.200 Kcal/kg
Gás de GLP (50%)	10.800 Kcal/kg	Trufa (seca ao ar) (25 a 6% água)	3.0000-5.000 Kcal/kg

Fonte: TEC tecnologia em calor LTDA,2024.