

GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E ANÁLISE DE SEU POTENCIAL ENERGÉTICO EM HABITAÇÃO MULTIFAMILIAR

Ana Beatriz Almeida da Silva ⁽¹⁾

Concluinte do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Estado do Pará

Daniele Aben-Athar Lobato da Silva ⁽²⁾

Concluinte do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Estado do Pará

Lucas Lemos Marialva ⁽³⁾

Concluinte do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Estado do Pará

Leonardo Araújo Neves ⁽⁴⁾

Professor do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Estado do Pará

RESUMO

Um estudo de habitação multifamiliar em Belém, Pará, foi concebido para investigar a gestão de resíduos sólidos urbanos. Este projeto abrangente incorporou uma meticulosa metodologia para estimar a geração de resíduos, identificar materiais recicláveis e avaliar o potencial de geração de energia a partir da incineração dos resíduos. Os resultados revelaram que o complexo habitacional (seis torres residenciais, cada uma composta por 21 apartamentos) geraria anualmente cerca de 230,02 toneladas de resíduos, dos quais aproximadamente 59,6 toneladas poderiam ser direcionadas para a coleta seletiva. Além disso, estimou-se que a incineração dos resíduos poderia gerar 8,28 MWh de eletricidade anualmente, o que representaria aproximadamente 10% do consumo de energia do complexo habitacional, por meio do método de cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) desenvolvido por Themelis (2003). Esses achados são cruciais para a gestão de resíduos em Belém e têm implicações mais amplas para o Brasil, destacando a importância da coleta seletiva, da reciclagem e da recuperação energética como estratégias fundamentais para a sustentabilidade ambiental. Essa pesquisa também enfatiza a necessidade contínua de explorar a geração de energia a partir de resíduos como uma alternativa ambientalmente amigável. Este estudo contribui significativamente para a compreensão e o aprimoramento das práticas de gestão de resíduos, alinhando-se com os desafios contemporâneos de sustentabilidade e gestão ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos. Coleta seletiva. Energia elétrica.

ABSTRACT

A study on multifamily housing in Belém, Pará, was designed to investigate the management of urban solid waste. This comprehensive project incorporated a meticulous methodology to estimate waste generation, identify recyclable materials, and assess the potential for energy generation through waste incineration. The results revealed that the residential complex (six residential towers, each consisting of 21 apartments) would generate approximately 230.02 tons of waste annually, of which around 59.6 tons could be directed to selective collection. Additionally, it was estimated that waste incineration could generate 8.28 MWh of electricity annually, representing approximately 10% of the energy consumption of the residential complex, using the Lower Heating Value (LHV) calculation method developed by Themelis (2003). These findings are crucial for waste management in Belém and have broader implications for Brazil, emphasizing the importance of selective collection, recycling, and energy recovery as fundamental strategies for environmental sustainability. This research also underscores the ongoing need to explore energy generation from waste as an environmentally friendly alternative. The study significantly contributes to the understanding and improvement of waste management practices, aligning with contemporary challenges in sustainability and environmental management.

KEYWORD: Solid waste. Selective collect. Electricity.

INTRODUÇÃO

Com mais de 200 milhões de habitantes, o Brasil é um dos países que mais gera resíduos sólidos, cuja destinação final deveria receber tratamento, de acordo com a legislação e as tecnologias atualmente disponíveis. No entanto, lamentavelmente, uma parcela significativa desses resíduos ainda é inadequadamente descartada, encontrando-se

frequentemente despejada a céu aberto, lançada na rede pública de esgotos ou até mesmo queimada. Essa prática prejudicial pode desencadear uma série de problemas ambientais e de saúde pública, incluindo a contaminação de solos, cursos d'água e lençóis freáticos, além da propagação de doenças como a dengue, leishmaniose, leptospirose e esquistossomose, cujos vetores frequentemente encontram nos lixões um ambiente propício para sua disseminação, conforme destacado pelo Ipea (2021).

De acordo com dados do Ministério do Meio Ambiente, em 2021, o Brasil contava com mais de 3.000 lixões a céu aberto em operação, o que representa um sério problema em relação à destinação inadequada de resíduos sólidos. Esses locais são altamente poluentes e não atendem aos padrões estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) – (Brasil, 2010).

Em consonância com essa preocupante realidade, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2022) revelou, em seu último panorama, que durante o ano de 2022, o Brasil gerou um total de resíduos aproximado de 81,8 milhões de toneladas, o que equivale a uma média de 224 mil toneladas diárias. Isso significa que cada brasileiro, em média, gerou cerca de 1,043 kg de resíduos por dia. Na Região Norte, a situação se agrava ainda mais, com uma geração média de resíduos em torno de 328 kg por habitante ao ano.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021) divulgou que a geração de energia a partir de fontes renováveis representou cerca de 83% da matriz elétrica brasileira. No entanto, a contribuição da geração de energia a partir de resíduos sólidos ainda estava aquém do seu potencial. Também em 2021, diversas iniciativas de geração de energia a partir de resíduos estavam em andamento no país. Um exemplo notável é a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos, que estava ganhando destaque como uma forma eficaz de aproveitar resíduos urbanos para gerar energia limpa.

Além disso, a legislação ambiental e de resíduos sólidos no Brasil também teve desenvolvimentos importantes recentemente, incluindo a regulamentação mais detalhada da Política Nacional de Resíduos Sólidos e a promoção de incentivos para a recuperação energética de resíduos. Elas contemplam diversas iniciativas relacionadas à geração de energia e à gestão de resíduos sólidos. Por exemplo, a Lei do Setor Elétrico (Lei nº 9.074/1995) estabelece diretrizes gerais para o setor elétrico, abrangendo a geração de energia e definindo o papel da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na regulação desse setor.

A Política Nacional de Energia (Lei nº 9.478/1997) define as diretrizes da política nacional de energia, com foco na promoção da diversificação da matriz energética e no uso sustentável dos recursos energéticos. Paralelamente, a Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Biocombustíveis (Lei nº 11.097/2005) incentiva o uso sustentável de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, como fontes de energia alternativa.

Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) não seja diretamente voltada para a geração de energia, ela desempenha um papel importante ao incentivar a recuperação energética de resíduos como parte das estratégias de tratamento de resíduos sólidos.

Já a Lei do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Lei nº 11.943/2009) instituiu o PROINFA, um programa destinado a promover a geração de energia a partir de fontes renováveis, como energia eólica, solar e biomassa.

Portanto, é imperativo enfrentar essa crise ambiental e de saúde pública por meio de uma gestão de resíduos sólidos e urbanos mais eficaz e alinhada com a Política Nacional de Resíduos Sólidos e com as tendências globais. A legislação aplicada a resíduos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece diretrizes para a gestão adequada desses materiais, incluindo a promoção da reciclagem, coleta seletiva, e ações voltadas para a recuperação energética, como a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos.

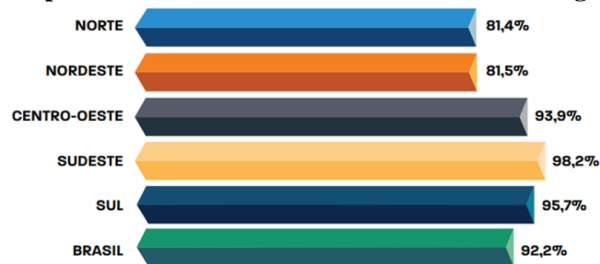
Neste contexto, este trabalho se propõe a analisar de forma mais detalhada o potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos, bem como a importância da legislação vigente para direcionar as políticas públicas e privadas na direção de uma gestão de resíduos mais sustentável e eficiente, em consonância com os desafios do cenário global e as necessidades locais de geração de energia, com base nos projetos arquitetônico, hidrossanitário e de esgoto sanitário de uma habitação multifamiliar.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No contexto da gestão de resíduos sólidos urbanos, vários fatores críticos e estruturas legislativas desempenham um papel fundamental na definição das estratégias e políticas para o manejo eficaz dos resíduos. Como destacado na literatura, diversos aspectos devem ser considerados para enfrentar os desafios relacionados à geração, coleta e disposição sustentável dos resíduos.

Um aspecto essencial é a disparidade regional nas práticas de gestão de resíduos, como demonstrado pela baixa porcentagem de coleta de resíduos na região Norte do Brasil, onde cerca de 20% dos resíduos gerados não são coletados, exacerbando questões ambientais e de saúde pública, de acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (Abrelpe, 2021).

Figura 1: Comparativo da coleta de resíduos em diferentes regiões brasileiras

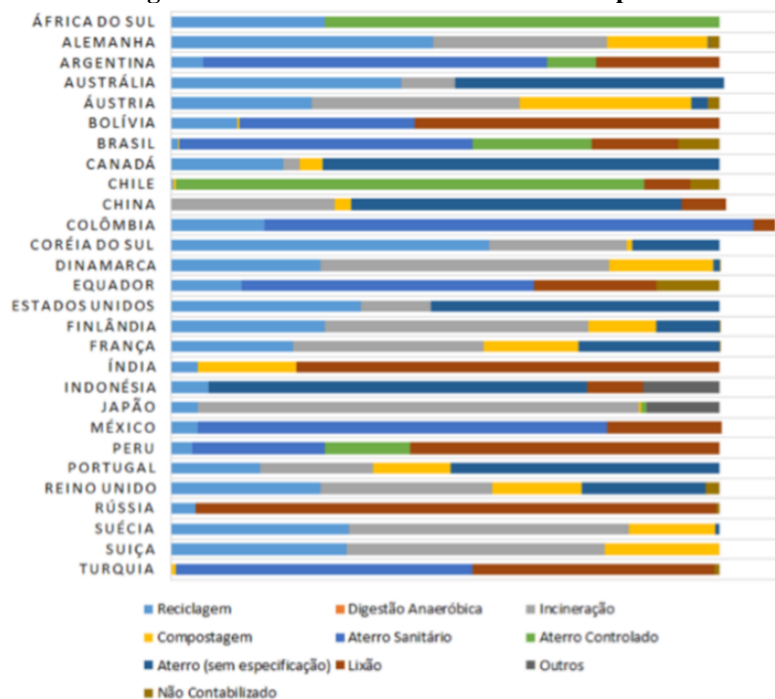


Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2021. (Abrelpe).

Embora estejam disponíveis no Brasil, as tecnologias necessárias para o cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – a qual estabelece diretrizes e metas para o desenvolvimento sustentável do país, incluindo a gestão eficiente dos resíduos sólidos de todas as naturezas -, os custos e a falta de uma maior integração na gestão dos RSU têm sido apontados por especialistas como os motivos para o comportamento supracitado, onde não há coleta de parte dos resíduos e, quando coletados, os RSU são depositados sem controle em locais impróprios para tanto.

De acordo com o relatório What a Waste 2.0 do Banco Mundial, há geração de cerca de 2,01 bilhões de toneladas de RSU por toda a população global, e prospecta-se que em 2050 esse número chegará a 3,40 bilhões de toneladas, o que representa um aumento de quase 70%. Para minimizar esse impacto, alguns países buscam usar tecnologia e inovação, tendo o tratamento como prioridade na gestão. Abaixo, tem-se a gestão dos resíduos realizada por cada um dos países selecionados para a pesquisa.

Figura 2: Gestão de resíduos em diferentes países



Fonte: World Bank (2018), What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.

A partir da problemática acerca dos resíduos sólidos no Brasil e no mundo, é necessário estudar mais a fundo quais são as políticas, normas e legislações que regulamentam o descarte adequado dos mesmos. Nesse sentido, precisa-se inicialmente compreender de que forma ele é classificado. Para isso Brasil, há a norma ABNT NBR 10004 de 2004:

Resíduos classe II - Não perigosos.

Resíduos classe II A - Não inertes. Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Resíduos classe II B - Inertes Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G.

Já a Lei nº 12.305/2010 identifica resíduos sólidos de origem domiciliar, de limpeza urbana, industrial, de serviços de saúde, de construção civil, agrossilvopastoris, de serviços de transportes e de mineração. Eles são enquadrados em duas categorias de periculosidade: (1) não perigosos; e (2) perigosos, que representam risco à saúde pública ou à qualidade ambiental por conta de características como inflamabilidade, corrosividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade.

Ademais, é importante entender os princípios da lei 12.305 de 2010, também conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS):

- I - proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- II - não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- III - estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
- IV - adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
- V - redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
- VI - incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
- VII - gestão integrada de resíduos sólidos;
- VIII - articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;
- IX - capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;
- X - regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira, observada a Lei nº 11.445, de 2007;
- XI - prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:
 - a) produtos reciclados e recicláveis;
 - b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;
- XII - integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
- XIII - estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
- XIV - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;
- XV - Estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

Ainda quanto à questão legal, é importante frisar que a Política Nacional de Mudanças Climáticas (Lei nº 12.187/2009) desempenha um papel crucial ao estabelecer metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e promover a geração de energia limpa e renovável como parte dos esforços para combater as mudanças climáticas.

Além disso, a Lei do Sistema de Pagamentos por Serviços Ambientais (Lei nº 12.651/2012) permite a criação de programas de pagamento por serviços ambientais, que podem incluir a remuneração pela geração de energia limpa.

Não só isso, mas também a Política Nacional de Biogás, ainda em processo de elaboração, visa fomentar a produção e o uso de biogás, incluindo a geração de energia a partir de resíduos orgânicos. Essas políticas e leis refletem o compromisso do Brasil em promover a geração de energia sustentável e a gestão adequada de resíduos, alinhando-se com as necessidades atuais e as tendências globais.

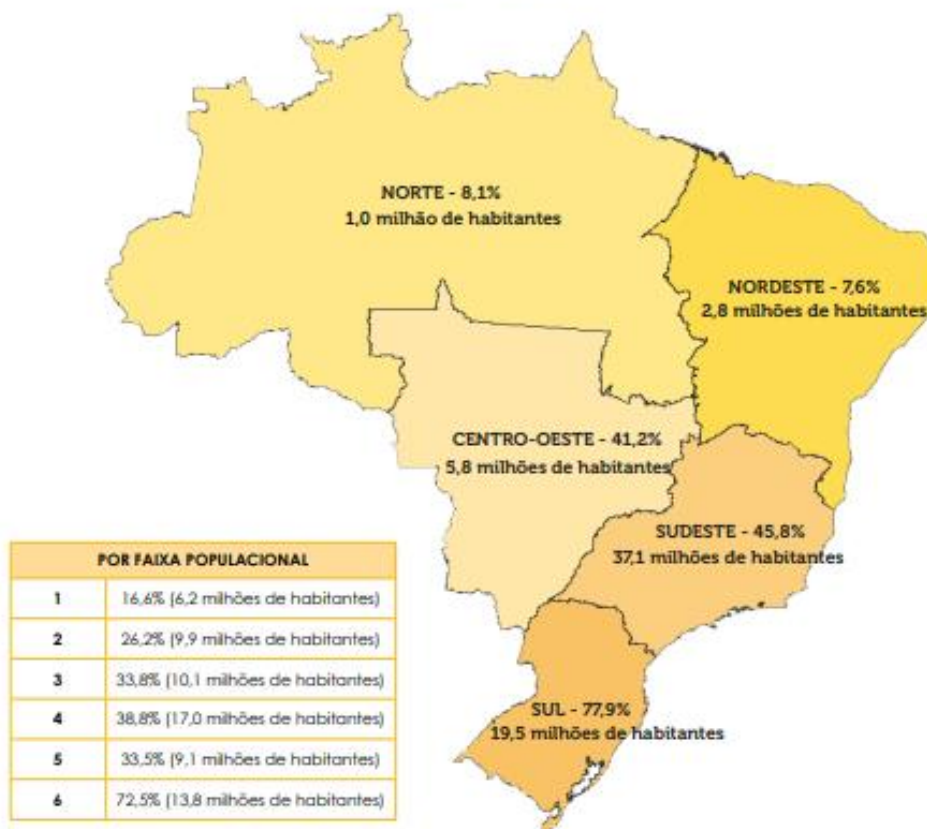
Em relação à quantificação da massa coletada estimada de RDO (resíduo domiciliar) e RPU (resíduo sólido público), o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) em seu Diagnóstico Temático de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, publicou a média de resíduos produzida por habitante, conforme figura abaixo.

Figura 3: Estimativa da geração de resíduos por habitante**Fonte: SNIS, 2020**

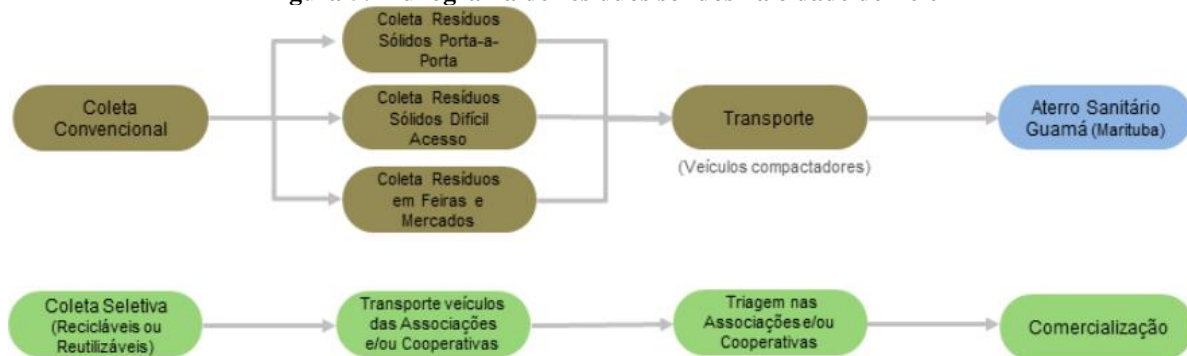
Quanto à coleta seletiva, tem-se que a porcentagem de municípios cobertos na região Norte é ainda menor que na média do Brasil, a qual já é considerada pequena quando comparada à de outros países cujas políticas de gestão de resíduos já estão mais fortemente estabelecidas. No mapa abaixo, é possível visualizar melhor o acesso da população de cada região à coleta seletiva porta a porta, que funciona da seguinte forma, de acordo com o SNIS de 2020:

Os resíduos domiciliares (RDO) secos são previamente separados pelos usuários e dispostos em calçada, testada de terrenos, via pública (em frente ou próximo a domicílios) e pontos de coleta de condomínio multifamiliar (vertical ou horizontal). O recolhimento é feito de forma regular pelo responsável pelo serviço ou contratado.

Figura 4: Mapa da população urbana brasileira com acesso à coleta seletiva
POPULAÇÃO URBANA COM COLETA SELETIVA DE RDO PORTA A PORTA
 (% e total por macrorregião geográfica, em 2020)

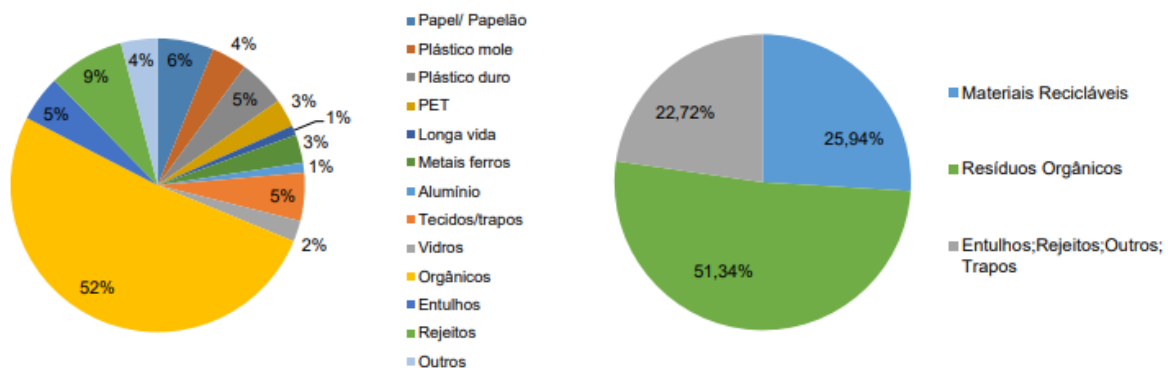
**Fonte: Relatório Temático de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, SNIS (2020).**

Além de focar mais na região Norte, o presente artigo aborda principalmente a cidade de Belém, capital do estado do Pará. Nesse cenário, é necessário abordar o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) do Município de Belém a fim de entender o fluxograma geral de resíduos sólidos da cidade, conforme abaixo:

Figura 5: Fluxograma de resíduos sólidos na cidade de Belém

Fonte: Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) do Município de Belém, 2020

Além de conhecer o fluxograma dos RSU, para que haja melhor gestão e gerenciamento de resíduos é preciso estimar a quantidade e que tipo de material é descartado, pois a partir desses dados é possível definir melhor as práticas de gestão dos resíduos e, eventualmente, estimar a energia que poderá ser gerada a partir do potencial energético dos resíduos, além de estimar a quantidade de material que poderá ser reciclado (FRICKE et al., 2015). Sendo assim, tem-se abaixo a composição gravimétrica dos resíduos sólidos do Brasil.

Figura 6: Composição gravimétrica de resíduos sólidos

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2022.

Além do panorama do cenário brasileiro, é importante destacar também alguns pontos relevantes da legislação internacional, a qual desempenha um papel fundamental na regulação do movimento de resíduos perigosos entre países. A Convenção de Basileia e a Convenção de Estocolmo são dois exemplos importantes desses esforços globais. A Convenção de Basileia, adotada em 1989, estabelece diretrizes para o controle de movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e seu descarte adequado. Ela visa garantir que os resíduos perigosos sejam tratados de maneira segura, protegendo a saúde humana e o meio ambiente. A Convenção de Estocolmo, por sua vez, concentra-se na eliminação progressiva de produtos químicos orgânicos persistentes que representam riscos significativos para a saúde e o meio ambiente.

Além disso, é mister entender que a transição para uma economia circular é uma tendência crescente. A Fundação Ellen MacArthur estima que a adoção de práticas de economia circular poderia gerar uma economia global adicional de US\$ 1 trilhão até 2025. Isso envolve a reutilização, reciclagem e recuperação de recursos, reduzindo a dependência de recursos naturais finitos.

Quanto às tendências futuras, espera-se que a digitalização desempenhe um papel crescente na gestão de resíduos sólidos. A adoção de tecnologias como sensores e análise de dados está permitindo uma coleta mais eficiente de resíduos, bem como a rastreabilidade ao longo de toda a cadeia de gestão. Essa abordagem, conhecida como "Smart Waste Management," tem o potencial de melhorar significativamente a eficiência e a sustentabilidade da gestão de resíduos.

Em resumo, a gestão de resíduos sólidos enfrenta desafios regionais e globais, com a necessidade de legislação internacional, a transição para uma economia circular, o desenvolvimento de tecnologias de recuperação energética e a crescente influência da digitalização moldando seu futuro.

Ademais, a pesquisa de Themelis (2003) é uma referência importante no campo da gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) e da geração de energia por meio da incineração desses resíduos. Themelis, em seu estudo,

abordou a questão do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos RSU, que é uma medida fundamental para avaliar o potencial de geração de energia durante o processo de incineração.

O PCI dos RSU é uma medida que quantifica a quantidade de energia liberada quando esses resíduos são queimados. Quanto maior o PCI, mais energia pode ser gerada durante a incineração. No entanto, é importante notar que nem todos os componentes dos RSU têm o mesmo PCI, e a composição dos resíduos pode variar significativamente de acordo com a localização geográfica e os hábitos de consumo da população.

A fórmula desenvolvida por Themelis para calcular o PCI dos RSU leva em consideração vários parâmetros, incluindo a participação da fração orgânica, o teor de umidade, a participação de papel, plástico, vidro e metal nos resíduos. Essa fórmula fornece uma maneira precisa de estimar o PCI com base na composição dos resíduos específicos de uma determinada região.

Além disso, Themelis destaca a importância de considerar a composição dos RSU ao projetar sistemas de gestão de resíduos e usinas de incineração, uma vez que a eficiência da incineração e a qualidade da energia gerada estão diretamente relacionadas aos materiais presentes nos resíduos.

METODOLOGIA

A fim de estimar da forma mais precisa possível a quantidade de resíduos gerados pela população hipotética que habitará o projeto em questão, foram desenvolvidos projetos abrangentes, incluindo arquitetônico, hidrossanitário e de esgoto sanitário. Este projeto destina-se a uma habitação multifamiliar e multifuncional com ênfase social, localizada na orla de Belém do Pará, especificamente em frente ao Portal da Amazônia. O terreno em questão abrange uma área total de 13.328,00 m² e abriga seis torres residenciais, cada uma composta por 21 apartamentos. O projeto arquitetônico foi concebido pelos autores durante o 4º semestre do curso de Engenharia Civil, enquanto os demais projetos foram desenvolvidos no 7º semestre, com base no trabalho anterior.

A quantidade de pessoas estimada por apartamento foi calculada a partir do projeto arquitetônico previamente idealizado. Pois, com base na possível disposição da mobília no apartamento, com o intuito de otimizar da melhor forma o espaço, é possível calcular quantos moradores poderiam viver ali confortavelmente.

A metodologia empregada para esta pesquisa foi iniciada por meio de uma pesquisa bibliográfica extensa, visando compreender as principais normativas relacionadas à gestão de resíduos sólidos domésticos e urbanos, bem como as políticas públicas vigentes nos âmbitos local, nacional e internacional.

Posteriormente, foi realizada uma estimativa da quantidade de habitantes por torre e, conseqüentemente, para o complexo residencial como um todo. Esse cálculo teve como objetivo quantificar a geração de resíduos do projeto, proporcionando a base para o dimensionamento e o posicionamento estratégico das lixeiras no terreno, considerando a coleta seletiva e de material orgânico.

A memória é composta por quatro equações, cada uma representando um cálculo diferente:

$$3 \text{ andares} * 4 \text{ apartamentos} * 6 \text{ pessoas} = 72 \text{ pessoas} \quad \text{equação (1)}$$

$$1 \text{ andar (térreo)} * 2 \text{ apartamentos} * 6 \text{ pessoas} = 12 \text{ pessoas} \quad \text{equação (2)}$$

$$3 \text{ andares} * 2 \text{ apartamentos} * 3 \text{ pessoas} = 18 \text{ pessoas} \quad \text{equação (3)}$$

$$1 \text{ andar (térreo)} * 1 \text{ apartamento} * 2 \text{ pessoas} = 2 \text{ pessoas} \quad \text{equação (4)}$$

A primeira equação calcula o número total de pessoas que residem em apartamentos de dois quartos nos andares superiores do prédio. Essa equação multiplica o número de andares superiores (3) pelo número de apartamentos por andar (4) e pelo número de pessoas por apartamento (6), resultando em um total de 72 pessoas.

A segunda equação calcula o número total de pessoas que residem em apartamentos de dois quartos no térreo do prédio. Essa equação multiplica o número de apartamentos do térreo (2) pelo número de pessoas por apartamento (6), resultando em um total de 12 pessoas.

A terceira equação calcula o número total de pessoas que residem em apartamentos de um quarto nos andares superiores do prédio. Essa equação multiplica o número de andares superiores (3) pelo número de apartamentos de um quarto por andar (2) e pelo número de pessoas por apartamento (3), resultando em um total de 18 pessoas.

A quarta equação calcula o número total de pessoas que residem no apartamento de um quarto no térreo do prédio. Essa equação multiplica o número de apartamentos (1) pelo número de pessoas por apartamento de um quarto (2), resultando em um total de 2 pessoas.

A soma dos resultados das quatro equações é 104 pessoas. Portanto, o prédio de apartamentos abriga um total de 104 pessoas.

Portanto, a equação para calcular o número total de habitantes é:

$$\text{Número de habitantes totais} = \text{número de habitantes por bloco} * \text{número de blocos} \quad \text{equação (5)}$$

A partir desses dados, é possível calcular também a média de coleta estimada de resíduos sólidos por bloco, cuja equação para calcular é:

$$\text{Média de coleta de RS por bloco} = \frac{\text{total de RS coletado por bloco}}{\text{n}^\circ \text{ de dias por ano}} \quad \text{equação (6)}$$

Então, calcula-se a média de coleta estimada de resíduos sólidos totais, que pode ser calculada por meio da seguinte fórmula:

$$\text{Média de coleta de RS totais} = \text{média de coleta estimada de RS por bloco} * \text{n}^\circ \text{ de blocos} \quad \text{equação (7)}$$

Como no presente estudo, o número de blocos é de 6. Portanto, a média de coleta estimada de resíduos sólidos totais é de:

$$\text{Média de coleta estimada de RS totais (kg/dia)} = \text{total por torre (kg/dia)} * 6 \text{ blocos} \quad \text{equação (8)}$$

Uma vez concluído o dimensionamento, prosseguiu-se com a análise da composição gravimétrica, como mencionado anteriormente. Essa análise teve como finalidade determinar a fração de resíduos passível de reciclagem, que não seria encaminhada para a coleta de lixo municipal. Além disso, realizou-se uma pesquisa local para identificar as empresas que poderiam executar o serviço de coleta seletiva, aprimorando ainda mais as estratégias de gestão de resíduos. O levantamento de possíveis prestadores de serviço foi realizado por meio de pesquisas em sites de pesquisa e de contato com cada um dos fornecedores mapeados nos sites para verificar se eles estavam aptos a fornecer o serviço de coleta seletiva.

Por fim, conduziu-se uma avaliação do potencial de geração elétrica por meio da incineração de resíduos sólidos urbanos, também com base na composição gravimétrica. Quanto à composição gravimétrica, foi utilizado o percentual estabelecido pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2022, conforme ilustra a Figura 6.

É relevante destacar que a tecnologia de incineração consome parte dos materiais recicláveis, como papel e plástico, juntamente com a fração orgânica do lixo para a geração de energia. Nesse contexto, aplicou-se a fórmula para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), conforme desenvolvida por Themelis (2003):

$$\text{PCI} = \frac{(18.500 * (\%FO * (1 - \%H_2O) + \%P + \%PI)) - (2.636 * (\%H_2O) * (\%FO)) - 628(\%V) - 544(\%M)}{4,18} \quad \text{equação (9)}$$

Onde:

%FO = participação da fração orgânica

%H₂O = teor de umidade

%P = participação de papel

%PI = participação de plástico

%V = participação de vidro

%M = participação de metal

A pesquisa de Themelis (2003) é relevante para a gestão de resíduos e a geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos, pois permite aos pesquisadores e profissionais estimar o potencial de geração de energia em instalações de incineração de resíduos. Isso é crucial para o planejamento de usinas de incineração, a avaliação de sua viabilidade econômica e ambiental, bem como para a promoção de fontes de energia renovável a partir de resíduos.

A partir das premissas estabelecidas por Themelis (2003), a presente metodologia foi desenvolvida e aplicada para uma análise minuciosa do potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos, alinhando-se aos objetivos deste estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro passo - dimensionar a geração de resíduos - teve os seguintes resultados estimado, de acordo com os dados supramencionados do SNIS, 2020, conforme Figura 3:

- Número de habitantes por bloco: 104 pessoas
- Número de habitantes totais (6 blocos): 624 pessoas

- Média de coleta estimada de resíduos sólidos por bloco: $1,01 \text{ kg/hab.dia} * 104 = 105,04 \text{ Kg/dia} = 38,47 \text{ t/ano}$
- Média de coleta estimada de resíduos sólidos totais: $630,24 \text{ Kg/dia} = 230,02 \text{ t/ano}$

Com base nos dados obtidos, os recipientes de resíduos sólidos foram posicionados em proximidade a cada um dos seis blocos, conforme ilustrado na imagem a seguir.

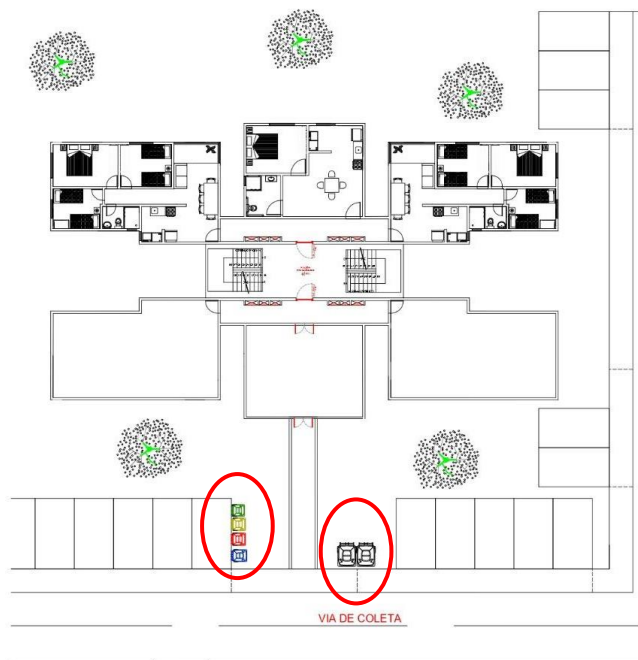


Figura 7: Localização dos reservatórios em cada edifício
Fonte: os autores, 2021

Em seguida, considerou-se a composição gravimétrica para obter os resultados em relação à quantidade de resíduos de cada tipo gerados em um ano, conforme a tabela a seguir:

Tabela 1: Quantidade de resíduos estimada no complexo habitacional

Tipo	% Gravimétrica	Quantidade gerada (kg/ano)
Orgânicos	52%	119619,55
Papel/papelão	6%	13802,26
Entulhos	5%	11501,88
Metais	3%	6901,13
Alumínio	1%	2300,38
Rejeitos	9%	20703,38
PET	3%	6901,13
Longa vida	1%	2300,38
Tecidos/trapos	5%	11501,88
Plástico mole	4%	9201,50
Plástico duro	5%	11501,88
Vidros	2%	4600,75
Outros	4%	9201,50

Fonte: os autores (2021), com base na composição gravimétrica de resíduos sólidos disponível no Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2022.

Desses resíduos, 25,94% (papel/papelão; plástico; vidro; alumínio; metais ferros; materiais orgânicos) são considerados recicláveis. Portanto, tem-se que:

- Média de coleta estimada de resíduos sólidos totais: $630,24 \text{ Kg/dia}$

- Material reciclável (25,94%): 163,48 Kg/dia, conseqüentemente, 59.670,20 Kg/ano.

Quanto ao levantamento de empresas/associações que poderiam realizar a coleta seletiva no município de Belém, foram obtidos os seguintes dados:

1. Cooperativa dos Catadores de Materiais Recicláveis - CONCAVES;
2. Associação de Catadores da Coleta Seletiva de Belém - ACCSB;
3. Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis “Filhos do Sol”;
4. Cooperativa dos Amigos Lix - COOPALIX (Aurá).

Na última etapa do estudo realizado, fez-se o cálculo estimativo do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos gerados pelo complexo habitacional em questão por meio da fórmula já mencionada anteriormente, considerando o teor de umidade igual a 46%, de acordo com a média obtida por Moreira et al (2016), o qual obteve tais resultados a partir de pesquisa acadêmica referente à geração de resíduos sólidos domiciliares, e utilizando 20% de eficiência, conforme estabelece a Empresa de Pesquisa Energética (EPE); obteve-se o resultado equivalente a 0,0349 MWh/t. Tendo em vista que são produzidos 230,02 t/ano de resíduos, ao final de um ano seriam gerados aproximadamente 8,28 MWh.

De acordo com Fedrigo et al (2022), o consumo de energia de uma residência brasileira é, em média, 52,2 KWh por mês. Aplicando este valor para o condomínio estudado, tem-se o consumo aproximado de 78,93 MWh por ano. Logo, a geração de energia elétrica poderia suprir cerca de 10% do consumo energético do conjunto habitacional projetado.

Primeiramente, ao dimensionar a geração de resíduos no complexo habitacional, observa-se que o mesmo produz uma quantidade significativa de resíduos sólidos, totalizando cerca de 230,02 toneladas anualmente. No entanto, destaca-se que aproximadamente 25,94% desses resíduos são classificados como recicláveis. Esse dado ressalta a importância de implementar práticas de coleta seletiva e reciclagem, não apenas como uma abordagem ambientalmente responsável, mas também como uma oportunidade econômica.

A coleta seletiva, quando efetivamente implementada em parceria com as cooperativas locais, como a Cooperativa dos Catadores de Materiais Recicláveis - CONCAVES e a Associação de Catadores da Coleta Seletiva de Belém - ACCSB, pode não apenas reduzir o impacto ambiental, mas também gerar empregos e benefícios econômicos para a comunidade local. A integração eficiente com essas entidades é crucial para o sucesso da iniciativa.

Além disso, a geração de energia a partir dos resíduos sólidos surge como uma estratégia promissora para o complexo habitacional. Com um potencial estimado de 8,28 MWh anualmente, essa abordagem oferece uma fonte de energia sustentável. No entanto, é importante notar que essa quantidade atende a apenas cerca de 10% do consumo energético anual do conjunto habitacional, conforme dados de Fedrigo et al (2022).

Portanto, surge a necessidade de considerar outras fontes de energia complementares para atender plenamente às demandas energéticas do complexo. Diversificar as fontes de energia, como solar ou eólica, pode ser uma estratégia a ser explorada para garantir a sustentabilidade a longo prazo.

Além disso, é crucial educar os moradores sobre a importância da separação adequada de resíduos e da reciclagem, bem como promover o engajamento da comunidade. A conscientização e a participação ativa dos residentes são fundamentais para o sucesso das iniciativas de gestão de resíduos e geração de energia sustentável. Por fim, à medida que se avança na implementação dessas estratégias, deve-se considerar as questões legais e regulatórias relacionadas à gestão de resíduos e geração de energia a partir de resíduos. A conformidade com regulamentações locais e nacionais desempenha um papel importante na viabilidade e na continuidade desses projetos.

Em resumo, os resultados apresentados nesta seção indicam um caminho promissor em direção à sustentabilidade ambiental e energética no complexo habitacional em estudo. No entanto, a implementação bem-sucedida dessas iniciativas requer uma abordagem integrada, envolvendo a comunidade, as cooperativas locais, tecnologias adequadas e um planejamento cuidadoso para garantir benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a comunidade residente.

CONCLUSÃO

O Brasil enfrenta desafios significativos no que diz respeito à gestão de resíduos sólidos e à geração de energia a partir desses resíduos. Com uma população de mais de 200 milhões de habitantes, o país é um dos maiores geradores de resíduos sólidos do mundo. No entanto, uma parte substancial desses resíduos ainda é inadequadamente descartada, resultando em graves problemas ambientais e de saúde pública.

A legislação brasileira, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos e outras políticas relacionadas à energia e meio ambiente, estabelece diretrizes importantes para a gestão adequada de resíduos e a promoção de fontes de

energia limpa e renovável. No entanto, ainda há desafios significativos na implementação efetiva dessas políticas, como evidenciado pela existência de mais de 3.000 lixões a céu aberto em operação em 2021.

A geração de energia a partir de resíduos sólidos ainda está aquém do seu potencial no Brasil, apesar dos esforços em curso, como a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos. No entanto, as políticas e leis existentes, como a Lei do Setor Elétrico, a Política Nacional de Mudanças Climáticas e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), demonstram o compromisso do país em promover a geração de energia sustentável.

Este estudo demonstrou, por meio de uma análise detalhada, que a gestão de resíduos em um complexo habitacional multifamiliar pode resultar na geração de uma quantidade significativa de resíduos recicláveis e na possibilidade de produzir energia elétrica a partir da incineração dos resíduos sólidos urbanos. No entanto, essa energia gerada representaria apenas cerca de 10% do consumo energético do complexo, destacando a necessidade de uma abordagem integrada que inclua a redução na geração de resíduos e o aumento da eficiência energética.

Em resumo, a gestão de resíduos sólidos e a geração de energia a partir de resíduos são áreas de extrema importância para o Brasil, dadas as implicações ambientais, sociais e de saúde pública. Para enfrentar esses desafios, é fundamental continuar desenvolvendo políticas e práticas que promovam a gestão adequada de resíduos e a transição para fontes de energia limpa e renovável. Além disso, a conscientização pública e a colaboração entre setores público e privado desempenham um papel crucial na busca por soluções sustentáveis e eficazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004
2. Abrelpe - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo, 2021.
3. BRASIL. Casa Civil. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010.
4. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307 de 05/07/2002.
5. CONVENÇÃO DE BASILEIA - Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Descarte. Basileia, Suíça, 1989.
6. CONVENÇÃO DE ESTOCOLMO - Poluentes Orgânicos Persistentes. Estocolmo, Suécia, 2001.
7. BRASIL. EPE. Nota Técnica DEA nº 18 de outubro de 2014. Apresenta o Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.
8. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 448 de 18/01/2012.
9. Fundação Ellen MacArthur. The Circular Economy in Action. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/pt>
10. FADINI, P.S. Quantificação de carbono dissolvido em sistemas aquáticos, através da análise por injeção em fluxo. Campinas, 1995. Dissertação de mestrado-Faculdade de Engenharia Civil-Universidade Estadual de Campinas, 1995.
11. FEDRIGO, N.S. et al. “Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro”. Santa Catarina, 2022.
12. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. 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: 20/05/2022
13. Lei do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Lei nº 11.943/2009): Institui o PROINFA para promover a geração de energia a partir de fontes renováveis. Disponível em: Presidência da República - Casa Civil.
14. Lei do Setor Elétrico (Lei nº 9.074/1995): Estabelece diretrizes gerais do setor elétrico brasileiro. Disponível em: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).
15. Lei do Sistema de Pagamentos por Serviços Ambientais (Lei nº 12.651/2012): Permite programas de pagamento por serviços ambientais, incluindo a remuneração pela geração de energia limpa. Disponível em: Presidência da República - Casa Civil.
16. MOREIRA, F.A., et al. Caracterização Físico-Química dos Resíduos Sólidos Gerados em Uma Instituição de Ensino Superior de Sete Lagoas - MG. Minas Gerais, 2016.
17. Política Nacional de Biogás (em elaboração): Destina-se a promover a produção e uso de biogás, incluindo a geração de energia a partir de resíduos orgânicos.
18. Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Biocombustíveis (Lei nº 11.097/2005): Incentiva o uso sustentável de biocombustíveis. Disponível em: Presidência da República - Casa Civil.
19. Política Nacional de Energia (Lei nº 9.478/1997): Define as diretrizes da política nacional de energia. Disponível em: Presidência da República - Casa Civil
20. Política Nacional de Mudanças Climáticas (Lei nº 12.187/2009): Estabelece metas de redução de emissões de gases de efeito estufa. Disponível em: Presidência da República - Casa Civil.
21. Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010): Promove a gestão adequada de resíduos sólidos. Disponível em: Presidência da República - Casa Civil.
22. PORTAL G1. Descarte e Coleta de Lixo são Responsabilidade das Prefeituras – Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/santos-regiao/eleicoes/2012/noticia/2012/08/descarte-e-coleta-de-lixo-sao-responsabilidade-das-prefeituras.html>> Acesso em: 20 de março de 2022.
23. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. Painel de Informações - Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-residuos-solidos>>. Acesso em: 19 de março de 2022.
24. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. Diagnóstico Temático: Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, 2021.
25. Themelis, N.J. (2003): Contribuição importante para a compreensão do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e sua relação com a geração de energia por meio da incineração.