



Rodrigo Daflon de Oliveira

**Análise das possibilidades de aproveitamento
energético em vazadouros desativados:
Estudo a partir do caso do Lixão de Jardim Gramacho**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Prof.^a Valéria Pereira Bastos

Rio de Janeiro
Abril de 2024



Rodrigo Daflon de Oliveira

**Análise das possibilidades de aproveitamento
energético em vazadouros desativados:
Estudo a partir do caso do Lixão de Jardim Gramacho**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof.^a Valéria Pereira Bastos

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Rafael Soares Gonçalves

Departamento de Serviço Social – PUC-Rio

Prof. Jean Marcel de Faria Novo

Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, 29 de abril de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e da orientadora.

Rodrigo Daflon de Oliveira

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UFF (Universidade Federal Fluminense) em 2006. Especializou-se em Engenharia de Máquinas Navais e Offshore na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 2014. É engenheiro Sênior na empresa DNV.

Ficha Catalográfica

Oliveira, Rodrigo Daflon de

Análise das possibilidades de aproveitamento energético em vazadouros desativados : estudo a partir do caso do Lixão de Jardim Gramacho / Rodrigo Daflon de Oliveira; orientadora: Valéria Pereira Bastos. – 2024.

92 f. : il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental - Teses. 3. Jardim Gramacho. 4. Lixões desativados. 5. Resíduos sólidos urbanas. 6. Aproveitamento energético. I. Bastos, Valéria Pereira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho ao meu pai, Manoel e à minha mãe, Maria, por me ensinarem desde cedo o verdadeiro significado da palavra resiliência e por me apoiarem em todos os momentos da minha vida.

Dedico à minha esposa Susanne pelo amor, carinho, serenidade e por vivermos na habitual harmonia do dia a dia.

Dedico à minha querida filha Zoe e ao meu querido filho Malik, simplesmente por existirem e por alegrar e iluminar todos os momentos da minha vida.

Dedico ao meu querido irmão Robson, pelo grande incentivo e pela tranquilidade que sempre me transmite.

Dedico aos meus colegas de trabalho, que me pouparam de algumas viagens de trabalho para que eu pudesse assistir às aulas, seja presencialmente ou remotamente.

Dedico aos meus amigos que compreenderam o meu afastamento social, permitindo que eu alcançasse mais essa conquista.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que tornaram possível a realização desta pesquisa e a conclusão deste mestrado. Este projeto só foi possível graças ao apoio e à contribuição de muitas pessoas e instituições. Portanto, gostaria de estender meus agradecimentos a:

A todos os professores desta instituição, especialmente à minha orientadora, Valéria Pereira Bastos, pela extrema paciência, dedicação, orientação e apoio incansáveis ao longo deste caminho, bem como pelas conversas sobre diversos outros assuntos. Sua sábia orientação e comprometimento com a excelência acadêmica foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Agradeço aos professores Rafael Soares Gonçalves e Jean Marcel de Faria Novo por aceitarem fazer parte da banca.

Aos meus colegas da turma 2020.1, pelas noites em que compartilhamos ideias, conhecimento e apoio acadêmico e pessoal durante a pandemia, e pela força que demos uns aos outros nos momentos difíceis.

Ao Tião Santos, por sua disponibilidade em auxiliar e fornecer os contatos necessários, e aos catadores, pelas conversas e histórias compartilhadas, seja com alegria, tristeza ou saudosismo, que são perfeitamente compreensíveis.

À PUC-Rio, por todo o suporte, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado. Agradeço também aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, em especial ao Victor Di Vaio, pelos constantes auxílios prestados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Oliveira, Rodrigo Daflon de; Bastos, Valéria Pereira. **Análise das possibilidades de aproveitamento energético em vazadouros desativados: estudo a partir do caso do Lixão de Jardim Gramacho.** Rio de Janeiro, 2024, 92p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O estudo realizado que originou esta dissertação buscou analisar as oportunidades de aproveitamento energético em locais de disposição final de resíduos sólidos urbanos. O campo empírico selecionado foi o extinto Lixão de Jardim Gramacho, localizado no município de Duque de Caxias – RJ, reconhecido como o maior da América Latina, que foi encerrado em 03 junho de 2012, e que, até os dias atuais está em processo de remediação. Através do trabalho de campo realizado, buscou-se analisar pela pesquisa de cunho qualitativo o real potencial transformador dos espaços desse lixão desativado, com foco na geração de energia a partir de fontes limpas e sustentáveis. A pesquisa documental nos permitiu conhecer melhor a legislação ambiental, pois foi fundamental para entender as atribuições de cada ator envolvido na gestão de resíduos sólidos e para identificar as oportunidades e desafios na implementação de projetos de aproveitamento energético. Constatou-se, através das pesquisas e cálculos realizados, que a combinação de diferentes modelos representa uma estratégia viável e sustentável para a gestão de resíduos no Lixão de Jardim Gramacho, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade ambiental e bem-estar social; tornando-se então evidente no que a gestão adequada de resíduos é um aspecto fundamental da sustentabilidade ambiental e social e do bem-estar humano, o que nos aponta a necessidade e importância da realização de um conjunto de práticas e políticas que visem a minimização dos impactos negativos dos resíduos gerados pela sociedade no ambiente.

Palavras-chave

Jardim Gramacho; lixões desativados; resíduos sólidos urbanos; aproveitamento energético.

Extended Abstract

Oliveira, Rodrigo Daflon de; Bastos, Valéria Pereira (Advisor). **Analysis of the possibilities of energy use in deactivated spillways: study based on the case of the Jardim Gramacho Landfill**. Rio de Janeiro, 2023, 92p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Adequate waste management is indeed fundamental to both environmental sustainability and human well-being and it encompasses a comprehensive set of practices and policies designed to minimize the negative impacts of waste generated by society. An effectively managing waste can mitigate pollution, conserve natural resources, protect ecosystems, and safeguard public health. Furthermore, proper waste management plays a crucial role in mitigating climate change by reducing greenhouse gas emissions from landfills. Adequate waste management is essential for achieving environmental sustainability and promoting human well-being and it requires concerted efforts from governments, businesses, communities, and individuals to adopt practices that minimize waste generation and maximize resource efficiency. However, achieving comprehensive and effective waste management is often hindered by a range of challenges and barriers. These obstacles can vary significantly depending on geographic location, socioeconomic factors, infrastructure capacity, and cultural behavior.

The adequate management of solid waste is crucial for promoting sustainable development (Ferreira et al., 2019), being a fundamental aspect of environmental sustainability and human well-being. It encompasses a set of practices and policies that aim to minimize the impacts of waste generated by society. The adequate management of solid waste is crucial for promoting sustainable development (Ferreira et al., 2019), being a fundamental aspect of environmental sustainability and human well-being. It encompasses a set of practices and policies that aim to minimize the impacts of waste generated by society. As a fundamental aspect of environmental sustainability and human well-being, adequate waste management encompasses a comprehensive range of

practices and policies aimed at minimizing the impacts of waste generated by society.

By effectively managing solid waste, we can address various environmental, social, and economic challenges. Proper waste management helps reduce pollution, conserve natural resources, protect ecosystems, and promote public health. Additionally, it contributes to mitigating climate change by minimizing greenhouse gas emissions from waste disposal. The implementation of sound waste management practices requires a multifaceted approach. This includes waste reduction at the source, reuse and recycling initiatives, as well as the safe and environmentally responsible disposal of remaining waste. Moreover, education, public awareness, and stakeholder engagement are crucial components of successful waste management strategies. By prioritizing sustainable waste management practices, communities can achieve multiple benefits, including improved environmental quality, enhanced public health, and economic opportunities through resource recovery and circular economy principles. Ultimately, integrating effective waste management into broader sustainability efforts is essential for building resilient and thriving societies both now and in the future.

Jardim Gramacho indeed held a significant place in the global landscape of waste management. As one of the largest landfills in the world, its closure in June 2012 marked the end of 34 years of operation. This closure signaled a pivotal moment not only for the local community in Rio de Janeiro but also for broader discussions surrounding waste management and environmental sustainability. Over its decades of operation, Jardim Gramacho bore witness to the immense volume of waste generated by urban centers and the challenges associated with its disposal. Its closure highlighted the pressing need for innovative solutions to address the environmental and social impacts of waste accumulation. While the closure of Jardim Gramacho marked the end of an era, it also presented an opportunity for transformation. Beyond its legacy as a landfill, Jardim Gramacho now stands as a symbol of potential—a site ripe for redevelopment and repurposing. In the years since its closure, efforts have been underway to remediate and rehabilitate the site, with a particular focus on exploring alternative uses, such as renewable energy generation or sustainable urban development. By leveraging the lessons learned

from Jardim Gramacho's history, stakeholders have the opportunity to chart a new course—one that prioritizes environmental stewardship, community well-being, and sustainable development. As we reflect on the closure of Jardim Gramacho and its significance, it serves as a reminder of the importance of responsible waste management practices and the need for collaborative efforts to build a more sustainable future for generations to come.

Jardim Gramacho Landfill, located in the state of Rio de Janeiro, in the municipality of Duque de Caxias, located in the sub-neighborhood of Jardim Gramacho, was the largest landfill in Latin America and received tons of waste daily until its deactivation in 2012 (Campos et al., 2018). The deactivation of this dump brought to light the need to find solutions for this area, which was previously intended only for the final disposal of waste. Transforming this space into an opportunity for energy use can bring significant environmental and economic benefits (Santos et al., 2019).

The dump began operating in the 1970s and continued receiving waste for several decades, becoming a primary disposal site for urban solid waste generated in Rio de Janeiro and surrounding areas. At its peak, Jardim Gramacho received thousands of tons of waste daily, contributing to significant environmental degradation and health hazards for nearby communities.

Over time, concerns about pollution, public health risks, and the unsustainable nature of the landfill prompted efforts to address the situation. These efforts culminated in the decision to close Jardim Gramacho, with the final disposal of waste ending on June 3, 2012.

The closure marked a significant milestone in the ongoing efforts to mitigate the environmental and social impacts associated with the landfill. However, the legacy of Jardim Gramacho extended beyond its closure, as the site required extensive remediation to address soil and water contamination, methane emissions, and other environmental hazards. The closure of Jardim Gramacho also had socio-economic implications for the waste pickers, or catadores, who relied on the landfill for their livelihoods. Many of these individuals were integrated into recycling cooperatives and provided with alternative sources of income and support as part of the closure and remediation process. Today, Jardim Gramacho serves as a symbol of the challenges and complexities associated with waste management in urban areas. Its history highlights the importance of sustainable waste management

practices, environmental stewardship, and community engagement in addressing the impacts of landfill operations on both the environment and society.

Deactivated landfills, also known as closed landfills or decommissioned landfills, represent a significant aspect of the waste management landscape. These sites have served their intended purpose of accepting and containing municipal solid waste but have undergone closure procedures due to reaching capacity, environmental concerns, regulatory requirements, or urban development pressures. Describing deactivated landfills entails exploring their characteristics, closure processes, post-closure management, environmental considerations, and potential reuse or redevelopment. Characteristics of Deactivated Landfills: Deactivated landfills vary widely in size, location, and composition based on factors such as population density, waste generation rates, and local regulations. They can range from small, community-level landfills to large-scale facilities serving major metropolitan areas. These sites typically consist of compacted waste layers capped with soil or synthetic materials to minimize environmental impacts and control gas emissions. Additionally, deactivated landfills may feature infrastructure such as leachate collection systems, gas extraction wells, and monitoring equipment to mitigate environmental risks.

The closure of a landfill entails a series of meticulously planned steps to ensure compliance with regulatory requirements and to minimize long-term environmental liabilities. Closure procedures typically include ceasing waste disposal activities, stabilizing waste materials, covering the landfill with a final cap or cover system, installing monitoring infrastructure, and implementing post-closure maintenance plans. Closure plans must address factors such as erosion control, leachate management, gas control, and groundwater protection to prevent environmental contamination and mitigate potential hazards.

Even after closure, deactivated landfills necessitate continuous monitoring and maintenance to safeguard environmental quality and public health. Post-closure management activities may include regular inspections, groundwater monitoring, gas monitoring, vegetation maintenance, and erosion control measures. These efforts aim to detect and address any signs of environmental degradation or potential risks associated with landfill gases, leachate migration, or surface water runoff. Effective post-closure management is essential to ensure the long-term

integrity and stability of deactivated landfills and minimize their impact on surrounding ecosystems and communities.

Deactivated landfills present environmental challenges due to the potential release of contaminants and ecological disruption. Despite closure measures designed to mitigate these risks, landfills continue to emit pollutants such as leachate, methane, volatile organic compounds (VOCs), and heavy metals. These substances can infiltrate groundwater, surface water, and air, posing threats to ecosystems, wildlife, and human health. Effective monitoring, containment, and remediation strategies are crucial to preventing or mitigating the environmental impacts of deactivated landfills and protecting natural resources and ecological habitats.

Although deactivated landfills may no longer function as waste disposal sites, they offer opportunities for reuse, redevelopment, and revitalization. With proper planning, remediation, and regulatory approval, former landfill sites can be repurposed for various beneficial uses such as parks, recreational areas, renewable energy facilities, green spaces, or commercial developments. Redevelopment projects can enhance community amenities, promote sustainable land use practices, and contribute to economic revitalization while transforming former landfill sites into valuable assets for local residents and stakeholders. Deactivated landfills represent a significant aspect of waste management infrastructure, requiring careful planning, closure procedures, and post-closure management to minimize environmental impacts and protect public health. While presenting environmental challenges, these sites also offer opportunities for reuse and redevelopment, demonstrating the potential for transforming former landfill sites into valuable assets for communities and the environment. Effective management of deactivated landfills requires a comprehensive approach that balances environmental protection, regulatory compliance, and sustainable land use practices to ensure the long-term integrity and viability of these sites.

The Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), or National Policy on Solid Waste, is a comprehensive framework established by the Brazilian government to address the management and disposal of solid waste in a sustainable manner. Its history is characterized by a gradual evolution of waste management practices and legislative initiatives aimed at mitigating environmental impacts, promoting recycling, and ensuring the proper disposal of waste. The origins of the

PNRS can be traced back to the Brazilian Constitution of 1988, which recognized the right to a healthy environment and established the responsibility of both the government and society for environmental protection. However, it wasn't until the early 2000s that the need for a more comprehensive approach to solid waste management gained significant attention.

In 2010, after years of discussions, consultations, and legislative efforts, Brazil enacted Law No. 12,305, which established the PNRS. This landmark legislation represented a significant step forward in the country's waste management practices by emphasizing principles such as extended producer responsibility, waste hierarchy (with priority given to waste prevention, reuse, and recycling), and the promotion of integrated waste management systems.

The PNRS introduced several key provisions, including:

- **Extended Producer Responsibility (EPR):** Producers and importers are responsible for the life cycle of their products, including collection and environmentally sound disposal of post-consumer waste.
- **Shared Responsibility:** All actors involved in the production, distribution, consumption, and disposal of products are responsible for waste management.
- **Waste Hierarchy:** The PNRS prioritizes waste prevention, followed by reuse, recycling, recovery, and finally disposal in landfills or incineration as a last resort. **National Solid Waste Plan (Plano Nacional de Resíduos Sólidos):** The PNRS mandated the development of a national plan to guide waste management policies and actions at the federal, state, and municipal levels.
- **Promotion of Recycling and Sustainable Practices:** The PNRS aims to promote recycling, encourage the development of recycling infrastructure, and support initiatives to reduce waste generation and promote sustainable consumption patterns.
- **Since its enactment, the PNRS has led to significant advancements in waste management practices in Brazil. However, challenges remain, including the need for improved infrastructure, increased**

public awareness, and enhanced regulatory enforcement. Nevertheless, the PNRS represents a crucial step forward in Brazil's efforts to address the environmental and social impacts of solid waste generation and disposal.

Despite its comprehensive framework and significant strides, the Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) in Brazil faces several challenges in its implementation and effectiveness. Some of these challenges, such as:

- **Infrastructure Deficiencies:** Brazil still lacks adequate infrastructure for waste collection, sorting, recycling, and disposal, particularly in rural and low-income urban areas. The absence of proper facilities hinders the efficient management of solid waste and contributes to environmental pollution.
- **Informal Waste Sector:** The presence of informal waste pickers, known as catadores, remains a significant challenge. While these individuals play a crucial role in recycling and waste management, they often work in hazardous conditions and face marginalization. Integrating informal waste pickers into formal recycling systems while providing them with fair wages, social protections, and access to training is essential for improving waste management practices.
- **Enforcement and Compliance:** Ensuring compliance with waste management regulations at all levels of government, as well as by producers and consumers, is a persistent challenge. Weak enforcement mechanisms and limited resources for monitoring and inspection undermine the effectiveness of waste management policies.
- **Financial Sustainability:** Financing sustainable waste management practices is another hurdle. Many municipalities struggle to fund waste management infrastructure and services, particularly those in economically disadvantaged regions. Establishing sustainable funding mechanisms, such as extended producer responsibility schemes and waste management fees, is crucial for long-term investment in waste management infrastructure.

- **Public Awareness and Education:** Despite efforts to promote environmental awareness and encourage waste reduction and recycling, public education remains a challenge. Many individuals and communities lack awareness of proper waste management practices and the environmental consequences of improper disposal. Increasing public education and engagement is essential for fostering a culture of waste reduction, recycling, and environmental stewardship.
- **Technological Innovation:** Embracing technological innovations in waste management, such as advanced recycling technologies and waste-to-energy systems, is critical for improving efficiency and reducing environmental impact. However, limited access to technology and expertise, particularly in smaller municipalities, poses a barrier to innovation.
- **Addressing these challenges** requires a coordinated effort from government agencies, private sector stakeholders, civil society organizations, and communities. By overcoming these hurdles, Brazil can further advance its efforts towards sustainable waste management and environmental protection under the PNRS.

Energy use in landfills presents several challenges, despite its potential benefits in terms of reducing greenhouse gas emissions and generating renewable energy. Implementing energy generation systems in landfills requires advanced technology and engineering expertise. Landfill gas collection and utilization systems, such as methane capture for electricity generation, require careful design, installation, and maintenance to ensure efficiency and safety.

The composition of landfill gas, primarily methane and carbon dioxide, can vary widely depending on factors such as waste composition, age of the landfill, and environmental conditions. Variability in gas composition can pose challenges for energy generation systems, affecting their performance and efficiency. Developing energy generation infrastructure in landfills, such as gas collection systems and power generation facilities, requires significant investment in both capital and operational costs. Building and maintaining this infrastructure can be

challenging, particularly for smaller landfills or those in remote areas with limited access to resources.

Landfill energy projects are subject to various regulations and permitting requirements aimed at ensuring environmental protection and public safety. Meeting these regulatory obligations can be time-consuming and costly, adding complexity to project development and implementation. While energy generation from landfill gas can help reduce greenhouse gas emissions, it also raises environmental concerns such as air pollution and potential groundwater contamination. Landfill gas contains not only methane but also trace amounts of other volatile organic compounds and hazardous air pollutants, which must be managed properly to minimize environmental impacts.

The economic viability of landfill energy projects depends on factors such as energy prices, project financing, and revenue streams from electricity sales or carbon offset credits. Fluctuations in energy markets and uncertainties about future revenue streams can affect the financial feasibility of such projects. Public Perception: Landfills are often viewed negatively by local communities due to concerns about odors, pollution, and impacts on property values. Introducing energy generation infrastructure in landfills may face opposition from residents and stakeholders, requiring effective communication and community engagement to address concerns and gain support.

To achieve the research objectives, the following methodology was used:

- **Definition of the Problem and Objectives:** The research problem and specific objectives were clearly defined, guiding the entire methodological process.
- **Bibliographic and Documentary Review:** An extensive review of existing literature on the research topic was conducted. This step was essential for identifying gaps in current knowledge and theoretically substantiating the study.
- **Data Collection:** Data was collected based on the literature review and the research objectives.
- **Data Analysis:** Collected data was analyzed using appropriate statistical and qualitative methods.

- **Interpretation of Results:** The results of the analysis were interpreted in light of the reviewed literature and the research objectives, identifying patterns, correlations, and possible implications.
- **Conclusions and Recommendations:** Conclusions were drawn based on the interpretation of results, addressing the research objectives. Practical recommendations and suggestions for future research were also made.

The methodology ensured the validity and reliability of the results, providing a solid basis for the conclusions and practical application of the research findings.

The analysis of existing energy recovery technologies, in accordance with the National Solid Waste Policy, revealed that thermochemical routes demonstrate considerable potential for energy recovery. For future research, a detailed study on the installation of photovoltaic panels at the Jardim Gramacho Recycling Center is suggested. This study should include the collection of data on daily and annual energy consumption to better size the system, as well as an economic analysis to determine the return on investment (ROI) and the payback period of the photovoltaic system

Keywords

Jardim Gramacho; deactivated landfills; urban solid waste; energy use.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. Introdução | 23 |
| 2. Oportunidades de aproveitamento energético em lixões desativados | 31 |
| 2.1. Especificidades dos resíduos para melhor aproveitamento energético | 31 |
| 2.1.1. Resíduos sólidos: definição e classificação | 31 |
| 2.1.2. Formas de disposição final dos resíduos sólidos | 33 |
| 2.2. O lixão de Jardim Gramacho e suas particularidades | 39 |
| 2.2.1. Uma breve história sobre o Lixão de Jardim Gramacho | 39 |
| 2.2.2. Situação dos (ex) catadores | 41 |
| 3. Política Nacional de Resíduos Sólidos e os normativos decorrentes | 44 |
| 3.1. A Lei socioambiental e seus desdobramentos | 44 |
| 3.1.1. Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos | 45 |
| 3.1.2. A desativação dos lixões | 48 |
| 3.2. Os Impactos gerados pelos lixões desativados e as possibilidades de aproveitamento energético | 49 |
| 3.3. Possibilidades de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos | 52 |
| 3.3.1. Termoquímica | 53 |
| 3.3.1.1. Incineração | 54 |
| 3.3.1.2 Gaseificação | 55 |
| 3.3.2. Bioquímica | 57 |
| 3.3.2.1. Biodigestão Anaeróbia da Fração Orgânica do RSU | 57 |

| | |
|--|----|
| 3.3.2.2. Disposição de RSU em Aterro Sanitário | 59 |
| 3.3.3. Síntese das Tecnologias de Aproveitamento Energético | 60 |
| 4. O caso do Lixão de Jardim Gramacho e as possibilidades de aproveitamento energético | 61 |
| 4.1. Conhecendo o campo de pesquisa e suas potencialidades | 61 |
| 4.1.1. Estudo de Caso | 62 |
| 4.1.2. Revisão da Literatura | 63 |
| 4.1.3. Coleta de Dados | 64 |
| 4.1.4. Análise crítica e sistematização dos dados | 66 |
| 4.1.5. Resultados e discussão do cenário | 68 |
| 4.1.6. Dados municipais socioeconômicos e demográficos | 70 |
| 4.1.7. Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos | 73 |
| 4.1.8. Potencial de Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos | 75 |
| 5. Considerações Finais | 82 |
| 6. Referências Bibliográficas | 84 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema de um aterro controlado com as medidas mínimas de redução de impactos ambientais | 36 |
| Figura 2 - Esquema de um aterro sanitário, com detalhamento de suas estruturas | 37 |
| Figura 3 - Diferenças principais entre os Aterro Sanitário x Controlado | 37 |
| Figura 4 - Entrada atual do Lixão Desativado de Jardim Gramacho | 40 |
| Figura 5 - Planta original do polo de reciclagem | 43 |
| Figura 6 - Impactos da disposição de resíduos sólidos em vazadouros a céu aberto | 51 |
| Figura 7 - Exemplo de lixão clandestino localizado próximo à entrada ao lixão desativado de Jardim Gramacho | 61 |
| Figura 8 - Exemplo de Galpão de Polo de Reciclagem existente em Jardim Gramacho | 65 |
| Figura 9 - Rede técnica real municipal - cenário business as usual | 68 |
| Figura 10 - Rede técnica idealizada regional - Cenário Metropolitano | 69 |
| Figura 11 - Entorno das ruas do bairro de Jardim Gramacho, sem a infraestrutura adequada | 71 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Classificação dos resíduos sólidos | 32 |
| Tabela 2 - Resíduos de fontes especiais | 33 |
| Tabela 3 - Tipos de destinação final - Cenário base - massa de RSU 2022 | 36 |
| Tabela 4 - Vantagens e desvantagens dos aterros sanitários | 38 |
| Tabela 5 - Dados socioeconômicos do município de Duque de Caxias | 71 |
| Tabela 6 - Dados de consumo de energia | 72 |
| Tabela 7 - Valores de Geração de Resíduos Sólidos Domésticos em Duque de Caxias | 73 |
| Tabela 8 - Metas previstas de recuperação de materiais recicláveis para 2023 | 76 |
| Tabela 9 - Potencial calorífico dos resíduos sólidos urbanos | 76 |
| Tabela 10 - Potencial de recuperação energético dos resíduos sólidos urbanos da região lixão de Gramacho | 80 |

Lista de abreviaturas e siglas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

CSR – Combustíveis Sólidos Recuperados

COMLURB – Companhia Municipal de Limpeza Urbana

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INEA – Instituto Nacional do Ambiente

PMGIRS – Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

“Não é possível pensar na sustentabilidade de uma cidade sem pensar na sustentabilidade de quem o cerca”

Fábio Rubio Scarano

1 Introdução

A gestão adequada dos resíduos sólidos é crucial para a promoção do desenvolvimento sustentável (Ferreira et al., 2019), sendo um aspecto fundamental da sustentabilidade ambiental e do bem-estar humano. Ela engloba um conjunto de práticas e políticas que visam a minimização dos impactos dos resíduos gerados pela sociedade. Essas práticas incluem a redução na geração de resíduos, a reutilização e reciclagem de materiais, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

A disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e seu acúmulo representam um desafio significativo para as sociedades contemporâneas (Gupta et al., 2018). Além dos impactos ambientais, também afeta significativamente a saúde pública e a qualidade de vida das comunidades (Silva et al., 2017).

Dentre as preocupações relacionadas à gestão dos resíduos sólidos, os lixões desativados merecem atenção especial. Afinal, além dos problemas associados à disposição inadequada dos resíduos, esses locais possuem um potencial desperdício de recursos energéticos (Kumar et al., 2020).

Portanto, o objetivo desta dissertação é analisar as oportunidades de aproveitamento energético em lixões desativados, tomando como estudo de caso o Lixão¹ de Jardim Gramacho, além de identificar tecnologias que estejam em conformidade com os princípios do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Segundo Pereira et al. (2021), compreender as possibilidades de transformação desses espaços em fontes de energia renovável é fundamental para uma gestão mais sustentável dos resíduos sólidos e para a mitigação das mudanças climáticas.

O Lixão de Jardim Gramacho, localizado no estado do Rio de Janeiro, no município de Duque de Caxias, situado no sub-bairro de Jardim Gramacho, foi o maior aterro sanitário da América Latina e recebeu toneladas de resíduos diariamente até sua desativação em 2012 (Campos et al., 2018). A desativação desse

¹ Lixão: é uma forma inadequada de disposição de rejeitos, que se caracteriza pelo simples descarte de resíduos sólidos urbanos sobre o solo. Ele acontece sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à qualidade de vida e saúde pública.. Disponível em <<https://www.ecycle.com.br/lixao>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

lixão trouxe à tona a necessidade de encontrar soluções para essa área, que antes era destinada apenas à disposição final dos resíduos. Transformar esse espaço em uma oportunidade de aproveitamento energético pode trazer benefícios ambientais e econômicos significativos (Santos et al., 2019).

Ao explorar o potencial de aproveitamento energético dos lixões desativados, é importante ressaltar a necessidade dos estudos de casos específicos, como o Lixão de Jardim Gramacho. De acordo com Ferreira et al. (2020), esses estudos fornecem *insights* valiosos sobre os desafios e oportunidades enfrentados nesse contexto específico. Analisar as experiências de transformação de um antigo lixão em um empreendimento sustentável permite extrair lições e recomendações aplicáveis a outras situações semelhantes.

No que diz respeito ao aproveitamento energético, a produção de biogás por meio da decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos é uma das abordagens mais promissoras (Kumar et al., 2018). O biogás, composto principalmente por metano, pode ser utilizado para a geração de eletricidade e calor, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a transição para uma matriz energética mais sustentável (Hossain et al., 2021).

Em relação ao aproveitamento energético em lixões desativados, além da produção de biogás por meio da decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos, existem outras abordagens promissoras que podem ser exploradas. A recuperação de energia térmica dos resíduos sólidos através da incineração é uma técnica que tem sido aplicada com sucesso em diversos países. No entanto para o Brasil deve ser levada em consideração a realidade que circunda os lixões, além da correta preparação de todo o processo a fim de evitar os problemas com a emissão de poluentes atmosféricos, como dioxinas e metais pesados, e a geração de resíduos sólidos e cinzas tóxicas. A queima controlada dos resíduos gera calor, que pode ser utilizado para a geração de vapor e, conseqüentemente, para a produção de eletricidade. Essa abordagem contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promove a transição para uma matriz energética mais sustentável (Stretta et al., 2020).

Outra opção é a produção de combustíveis sólidos recuperados (CSR) a partir dos resíduos sólidos. Esses combustíveis podem ser utilizados como substitutos de combustíveis fósseis em processos industriais, reduzindo a dependência de fontes não renováveis e mitigando as emissões de gases de efeito

estufa. O aproveitamento energético por meio de CSR a partir dos resíduos de lixões desativados é uma alternativa interessante do ponto de vista econômico e ambiental (Wei et al., 2021).

Além dessas alternativas, o gás de aterro, composto principalmente por dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), pode ser capturado e utilizado como fonte de energia. A gaseificação ou pirólise do gás de aterro permite sua transformação em eletricidade, calor ou combustíveis. Essa abordagem de aproveitamento energético dos resíduos de lixões desativados é fundamental para a valorização energética dos resíduos e a redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Maggiore et al., 2020).

A implementação de projetos de aproveitamento energético em lixões desativados pode gerar benefícios socioeconômicos para as comunidades locais. Conforme afirmado por Silva et al. (2019), esses projetos têm o potencial de criar empregos locais, promover o desenvolvimento sustentável e melhorar a qualidade de vida das pessoas afetadas.

Através do estabelecimento de parcerias público-privadas e da participação ativa da população local, é possível construir uma estratégia abrangente que englobe aspectos sociais, econômicos e ambientais na gestão de lixões desativados (Abdullah et al., 2020). A colaboração entre as partes interessadas, incluindo governos, empresas e organizações da sociedade civil, é essencial para o sucesso desses empreendimentos (Pereira et al., 2022).

No entanto, é importante ressaltar que a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético em lixões desativados pode variar de acordo com diferentes fatores. A composição dos resíduos, a disponibilidade de tecnologias apropriadas e as condições locais são aspectos que devem ser considerados durante a fase de planejamento e implementação desses projetos (Mishra et al., 2021). Estudos de viabilidade e avaliações de impacto ambiental são fundamentais para embasar as decisões tomadas nesse sentido (Rocha et al., 2018).

Ao analisar o caso específico do Lixão de Jardim Gramacho, espera-se obter *insights* relevantes sobre os desafios e oportunidades enfrentados na transformação desse local em uma fonte de energia renovável. As lições aprendidas nesse estudo de caso podem contribuir para o desenvolvimento de estratégias e políticas mais eficazes de gestão de lixões desativados em todo o país (Camargo et al., 2020).

Ao explorar o potencial de transformação desses locais em fontes de energia renovável, busca-se promover uma gestão mais sustentável dos resíduos sólidos, contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e impulsionar o desenvolvimento socioeconômico das comunidades envolvidas.

O estudo e entendimento do PNRS/2010 foi de extrema importância para a condução dessa pesquisa, visto que o mesmo forneceu um arcabouço jurídico robusto e abrangente para a gestão adequada dos resíduos sólidos no país. Instituído pela Lei nº 12.305/2010, a política estabelece diretrizes, metas e estratégias fundamentais para a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final dos resíduos, promovendo a sustentabilidade ambiental e a saúde pública. Uma das principais diretrizes do PNRS é o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que envolve fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana. Esse princípio foi considerado na análise das redes técnicas de resíduos sólidos e na identificação de atores relevantes para o estudo de caso. A implementação das diretrizes e estratégias do PNRS pode transformar passivos ambientais em ativos sustentáveis, contribuindo para a proteção ambiental, a saúde pública e a promoção de práticas econômicas mais sustentáveis.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) dos rejeitos é uma medida da quantidade de energia liberada durante a combustão dos resíduos, e refere-se à energia liberada pela combustão dos materiais contidos nos resíduos, excluindo o calor latente da água produzida durante a combustão. O PCI é um parâmetro crucial em várias aplicações, especialmente na gestão de resíduos e na produção de energia a partir desses materiais. Ele exerce uma influência direta na eficiência e na viabilidade econômica dos processos de recuperação energética. O cálculo do PCI foi de extrema importância para a conclusão dos estudos desta pesquisa.

A justificativa desta dissertação se baseia na necessidade urgente de encontrar soluções sustentáveis para a gestão dos resíduos sólidos, especialmente em relação aos lixões desativados. Esses locais representam um desafio ambiental significativo, uma vez que a disposição inadequada dos resíduos resulta em grandes impactos ambientais, comprometendo a saúde pública e a qualidade de vida das comunidades locais e próximas. Além disso, essas áreas possuem um potencial desperdício de recursos energéticos, os quais podem ser explorados por meio de diferentes tecnologias de aproveitamento energético. Portanto, este estudo se

justifica na necessidade de análises e na proposição de alternativas viáveis e sustentáveis para o aproveitamento energético em lixões desativados, com ênfase no estudo de caso do Lixão de Jardim Gramacho, a fim de promover uma gestão mais eficiente dos resíduos sólidos, reduzir os impactos ambientais e contribuir para a transição para uma matriz energética mais sustentável.

O racismo ambiental é um fenômeno que afeta desproporcionalmente comunidades racializadas e de baixa renda. Ao investigar e expor essa realidade em uma área como o entorno do Jardim Gramacho, a pesquisa visa contribuir para a conscientização pública sobre a persistência das desigualdades raciais e sociais, além de promover debates importantes sobre justiça ambiental e equidade, a fim de promover políticas e práticas que protejam a saúde e o bem-estar dessas comunidades. A escolha do tema para a pesquisa foi um processo que exigiu certa reflexão e após considerar cuidadosamente diversas áreas de estudo, decidi focar minha pesquisa em um campo mais multidisciplinar que envolve soluções de Engenharia aplicadas a questões sociais, extremamente importantes, como o Estudo de caso do Jardim Gramacho, ressaltando a importância da busca e viabilidade do uso de energias limpas para aquela área. Esta escolha foi motivada por algumas razões significativas que gostaria de compartilhar.

Em primeiro lugar, o tema despertou meu interesse devido à sua relevância e importância no contexto atual e por explorar questões que têm impacto real na sociedade e que necessitam de contribuições para soluções significativas. A pesquisa oferece a oportunidade de abordar questões urgentes e desafiadoras que afetam diretamente indivíduos e comunidade. A escolha deste tema está alinhada com meus objetivos profissionais e pessoais de longo prazo, pois reconheço a importância de adquirir habilidades e conhecimentos que me permitam fazer contribuições significativas nesta área. Além disso, minha motivação vem do desejo de fazer uma diferença positiva no mundo. Vejo minha pesquisa como uma oportunidade não apenas de expandir o conhecimento existente, mas também de promover mudanças significativas e impactantes na sociedade, gerando insights valiosos e inspirando ações concretas que possam melhorar a vida das pessoas nessas áreas. A reutilização de lixões desativados para aproveitamento energético pode ser uma solução interessante para lidar com resíduos sólidos e gerar energia de forma sustentável. Entre os diversos atores, é preciso ressaltar o problema da capacitação dos ex catadores que viviam, basicamente, das atividades realizadas no

Lixão de Jardim Gramacho e que dependem de fortes investimentos governamentais que não têm continuidade e são esporadicamente realizados, mais por motivos políticos do que por investimentos sociais. Infelizmente, os catadores de materiais recicláveis ainda são tratados como párias do mercado de trabalho (Bastos et al., 2019).

A fim de atingir os objetivos da pesquisa foram considerados os seguintes pontos:

- Realizar um levantamento detalhado das características do Lixão de Jardim Gramacho, incluindo sua história, localização geográfica, volume de resíduos depositados e estado atual de desativação.
- Explorar tecnologias e abordagens de aproveitamento energético em lixões desativados, como biogás, energia térmica, CSR, e gás de aterro, em conformidade com o PNRS/2010.
- Avaliar a viabilidade econômica e ambiental das diferentes alternativas de aproveitamento energético em lixões desativados, considerando os custos de implementação, benefícios socioeconômicos, redução das emissões de gases de efeito estufa e potencial de geração de energia renovável.
- Realizar um estudo das redes técnicas urbanas com o objetivo de identificar oportunidades para o aproveitamento energético dos resíduos, como a produção de biogás, contribuindo assim para a geração de energia mais limpa.
- Analisar os impactos ambientais associados às diferentes tecnologias de aproveitamento energético, levando em conta aspectos como emissões de gases poluentes, disposição final dos resíduos remanescentes e uso sustentável dos recursos naturais.
- Propor recomendações e diretrizes para a implementação de projetos de aproveitamento energético em lixões desativados, considerando as particularidades do Lixão de Jardim Gramacho, visando promover uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos sólidos, além de estimular a adoção de práticas ambientalmente responsáveis.

Para atingir os objetivos da pesquisa, a seguinte metodologia foi utilizada:

1. Definição do problema e objetivos: o problema de pesquisa foi claramente definido, juntamente com os objetivos específicos a serem alcançados. Isso ajudou a orientar o desenvolvimento de todo o processo metodológico.
2. Revisão bibliográfica e documental: foi realizada uma revisão extensiva da literatura existente sobre o tema da pesquisa. Esta etapa foi fundamental para identificar lacunas no conhecimento atual, bem como para fundamentar teoricamente o estudo.
3. Coleta de dados: com base na revisão da literatura e nos objetivos da pesquisa, foi realizada a coleta de dados.
4. Análise de dados: após a coleta, os dados foram analisados utilizando métodos estatísticos e qualitativos adequados.
5. Interpretação dos resultados: Os resultados da análise foram interpretados à luz da literatura revisada e dos objetivos da pesquisa. Isso incluiu a identificação de padrões, correlações e possíveis implicações dos achados.
6. Conclusões e recomendações: com base na interpretação dos resultados, foram elaboradas conclusões que responderam aos objetivos da pesquisa. Também foram feitas recomendações práticas e sugestões para futuras pesquisas sobre o tema.

A metodologia foi implementada visando assegurar a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos, proporcionando uma base sólida para a conclusão e aplicação prática dos achados da pesquisa.

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos além das referências bibliográficas e anexos. O primeiro capítulo compreende a introdução com a contextualização do tema, o problema da pesquisa, objetivos, metodologia e limites da pesquisa. O segundo capítulo apresenta oportunidades de aproveitamento energético em lixões ativados, ficando especialmente no caso de Jardim Gramacho.

No terceiro capítulo a Política Nacional de Resíduos Sólidos é apresentada e discutida com vistas no tema dessa pesquisa. O quarto capítulo aborda os Métodos utilizados na pesquisa, incluindo o detalhamento do estudo de caso, a apresentação da coleta de dados, bem como a sistematização dos mesmos. No quinto capítulo encontram-se as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

2

Oportunidades de aproveitamento energético em lixões desativados

2.1.

Especificidades dos resíduos para melhor aproveitamento energético

2.1.1.

Resíduos sólidos: definição e classificação

Conforme mencionado por Philippi Jr. e Aguiar (2015), os resíduos sólidos são os produtos resultantes das ações humanas, possuindo características particulares que são geralmente determinadas pelo método de sua geração. Por outro lado, os rejeitos englobam todos os resíduos que não podem ser economicamente aproveitados por meio de nenhum processo tecnológico disponível e de fácil acesso.

De acordo com Dias e Vaz (2022), os resíduos sólidos abrangem todos os materiais descartados nas atividades domésticas, comerciais e de serviços, assim como materiais com diferentes características, desde inertes até orgânicos, provenientes de manipulação de alimentos e poda, embalagens de vidro, plástico, metal e papel/papelão, além de resíduos perigosos, como embalagens de produtos para controle de pragas domésticas, tintas e óleos, bem como aqueles provenientes de clínicas, ambulatórios, hospitais e instituições semelhantes.

Conforme a definição estabelecida pela Norma NBR 10004:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os resíduos sólidos são caracterizados como materiais nos estados sólido e semissólido que são gerados a partir de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição.

Conforme estabelecido pela Norma NBR 10004:2004, os resíduos sólidos são categorizados em diferentes classes, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos resíduos sólidos

| Classificação | | Descrição |
|---------------------------------|----------------------------------|---|
| Resíduos Classe I Perigosos | | Esses resíduos representam uma ameaça à saúde pública, podendo causar mortes ou doenças, além de representarem um risco ao meio ambiente, devido às suas características intrínsecas, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. |
| Resíduos Classe II Não Perigoso | Resíduos Classe II A Não Inertes | Esses resíduos não se encaixam nas categorias de resíduos Classe I (Perigosos) ou Classe II B (Inertes) e podem possuir características de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. |
| Resíduos Classe II Não Perigoso | Resíduos Classe II B Inertes | Esses resíduos não apresentam riscos significativos à saúde e ao meio ambiente. Quando amostrados de maneira representativa, de acordo com a norma ABNT NBR 10007, e submetidos a testes de contato com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, nenhum de seus constituintes deve se solubilizar em concentrações acima dos padrões de potabilidade da água, exceto em relação a aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. |

Fonte: NBR 10004 (2004).

Em relação a sua natureza ou origem, os resíduos sólidos podem ser categorizados em:

- Resíduo doméstico ou residencial: refere-se aos resíduos gerados nas atividades cotidianas de residências, como casas, apartamentos, condomínios e outras estruturas habitacionais (Monteiro, 2001);
- Resíduo comercial: é originado de estabelecimentos comerciais, como lojas, lanchonetes, restaurantes, escritórios, hotéis e bancos. Os principais componentes encontrados nesse tipo de resíduo incluem papéis, papelões, plásticos, restos de alimentos, embalagens de madeira, resíduos de lavagens e sabões (Lima, 2014);
- Resíduo público refere-se aos resíduos provenientes dos serviços de limpeza pública urbana, abrangendo os resíduos resultantes da limpeza de vias públicas, de praias, galerias, córregos e terrenos, além dos restos de podas de árvores (Donha, 2022);
- Resíduo domiciliar especial: é um grupo que engloba os resíduos provenientes da construção civil, como entulhos e restos de obras, além de materiais específicos como pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus (Monteiro et al., 2001);
- Resíduos de fontes especiais: são aqueles que, devido às suas características particulares, requerem cuidados especiais em termos de manuseio, armazenamento, transporte e disposição final (Monteiro et

al., 2001). Esses resíduos estão listados na Tabela 2, incluindo exemplos como substâncias químicas perigosas, radioativos, infectantes, entre outros.

Tabela 2 - Resíduos de fontes especiais

| | |
|---|---|
| Resíduo industrial | Originado nas atividades dos diversos ramos da indústria, tais como: metalúrgica, química, petroquímica, papelreira, alimentícia (DONHA, 2022) |
| Resíduo radioativo | Resíduos que emitem radiações acima dos limites permitidos pelas normas ambientais. No Brasil, o manuseio, acondicionamento e disposição final do lixo radioativo está a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (Monteiro, 2001) |
| Resíduos de portos, aeroportos e terminais rododiferroviários | Resíduos gerados em terminais de transporte, navios, aviões, ônibus e trens, com potencial de causar doenças (ANVISA, 2016) |
| Resíduo agrícola | Restos de embalagens impregnados com pesticidas e fertilizantes químicos, utilizados na agricultura, que são perigosos (Monteiro, 2001) |
| Resíduos de serviços de saúde | Resíduos provenientes de qualquer atividade de natureza médico-assistencial humana ou animal, clínicas odontológicas, veterinárias, farmácias, centros de pesquisa - farmacologia e saúde, medicamentos vencidos, necrotérios, funerárias, medicina legal e barreiras sanitárias (ANVISA, 2016) |

Fonte: Adaptado pelo autor (2023).

2.1.2.

Formas de disposição final dos resíduos sólidos

O descarte de resíduos sólidos em lixões a céu aberto é uma prática desorganizada que não envolve compactação ou cobertura adequada dos resíduos, resultando na contaminação do solo, ar e água, além da propagação de doenças por vetores. Por outro lado, os aterros controlados são uma outra forma de disposição de resíduos, onde o único cuidado tomado é a cobertura dos resíduos com uma camada de solo no final de cada dia de trabalho, visando minimizar a proliferação de vetores de doenças (Zanta; Ferreira, 2023).

A disposição de resíduos sólidos a céu aberto também propicia a multiplicação de insetos como mosquitos, moscas, baratas e ratos, que são portadores de diversas doenças para os seres humanos, como febre tifoide, salmonelose, disenteria e outras infecções. Além desses insetos, é comum encontrar animais domésticos, como cães, gatos e aves, que também podem transmitir doenças como a toxoplasmose (Rouquayrol; Almeida Filho, 2019).

De acordo com Fernandes (2021), o lixão é caracterizado pela simples descarga de resíduos sem qualquer tipo de tratamento diretamente sobre o solo, sem medidas de proteção ambiental ou de saúde pública, sendo esse método predominante na maioria dos municípios.

A predominância do uso de lixões como método de disposição final ocorre devido aos seguintes fatores, conforme mencionado por Alberte et al. (2015):

- Limitação financeira devido a orçamentos inadequados, fluxo de caixa desequilibrado, tarifas desatualizadas, arrecadação insuficiente e inexistência de linhas de crédito;
- Falta de capacitação técnica e profissional, em todos os níveis de formação;
- Descontinuidade política e administrativa;
- Menor custo quando comparada com outros processos, exigindo poucos equipamentos e mão-de-obra não especializada;
- Grande parte dos municípios brasileiros é de pequeno porte e gera uma quantidade de lixo que, em princípio, não justifica grandes instalações;
- A maioria dos pequenos municípios ainda possui áreas próximas disponíveis para a construção dos aterros.

Além dos problemas relacionados ao chorume e aos gases gerados pela decomposição do lixo, existem outras questões associadas à sua disposição que também merecem atenção (Lanza, 2020).

Um aterro sanitário é uma solução utilizada para a disposição final dos resíduos sólidos produzidos pelas atividades humanas. Nele são depositados diversos tipos de resíduos, como os domiciliares, comerciais, de serviços de saúde, industriais e resíduos sólidos provenientes do tratamento de esgoto (D'Almeida, 2022).

De acordo com a NBR 8419:1992, os aterros sanitários são definidos como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, com o objetivo de evitar danos à saúde pública e garantir a segurança, minimizando os impactos ambientais. Essa abordagem se baseia em princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos em uma área reduzida e diminuir seu volume ao máximo permitido.

Além disso, os resíduos são cobertos com uma camada de terra ao final de cada dia de trabalho, ou em intervalos menores, se necessário.

De acordo com o Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos (Monteiro, 2001), existem duas categorias de aterros: aterros sanitários e aterros controlados. A principal diferença entre eles é que os aterros sanitários contam com sistemas de coleta e tratamento do chorume, bem como drenagem e queima do biogás gerado. Essas medidas visam minimizar os impactos ambientais causados pela decomposição dos resíduos, promovendo maior proteção à saúde pública e ao meio ambiente. Por outro lado, os aterros controlados não possuem esses sistemas avançados de tratamento, o que pode resultar em maiores riscos de contaminação do solo, água e ar.

Conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos (ABRELPE, 2022), aproximadamente 39% dos resíduos coletados são destinados a lixões ou aterros controlados, conforme mostrado na Tabela 3. Embora ainda seja uma porcentagem significativa, é positivo notar uma redução em comparação com os dados de 2013, compreendendo um período de aproximadamente 10 anos, porém mesmo com essa diminuição, a destinação dos resíduos coletados para lixões ou aterros controlados ressalta a persistência de um problema sério de gestão de resíduos sólidos no Brasil.

Esses números destacam a necessidade contínua de investimentos e ações direcionadas para melhorar a infraestrutura de gestão de resíduos no país. O encerramento de lixões e aterros controlados, juntamente com a implementação de sistemas modernos de gestão de resíduos, como a coleta seletiva, a reciclagem e a compostagem, são passos essenciais para mitigar os impactos negativos no meio ambiente e na saúde pública. Além disso, é fundamental que o poder público, a iniciativa privada e a sociedade civil trabalhem em conjunto para promover a conscientização sobre a importância da destinação adequada de resíduos e incentivar práticas mais sustentáveis. Isso inclui campanhas de educação ambiental, programas de incentivo à separação de resíduos na fonte e medidas para estimular a economia circular.

Embora os desafios relacionados à gestão de resíduos sólidos sejam complexos, é possível superá-los com uma abordagem integrada e comprometida, com a certeza de que a redução da quantidade de resíduos destinados a lixões e aterros controlados é um passo crucial na direção de um futuro mais sustentável e resiliente para o Brasil.

Tabela 3 - Tipos de destinação final - Cenário base - massa de RSU 2022

| Destinação | Massa (t/ano) |
|---------------------------------------|----------------------|
| Aterro sanitário (sem aproveitamento) | 42.141.039,68 |
| Aterro sanitário (com aproveitamento) | 4.271.051,32 |
| Aterro controlado | 17.322.000,00 |
| Lixão | 12.384.226,00 |
| Total | 76.118.317,00 |

Fonte: Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2022).

As figuras 1 e 2 ilustram algumas das diferenças entre aterros controlados e aterros sanitários. Enquanto a figura 3 ilustra algumas vantagens e desvantagens entre os mesmos.



Figura 1 - Esquema de um aterro controlado com as medidas mínimas de redução de impactos ambientais.

Fonte: Fundação Estadual de Meio Ambiente – FEAM (2018).

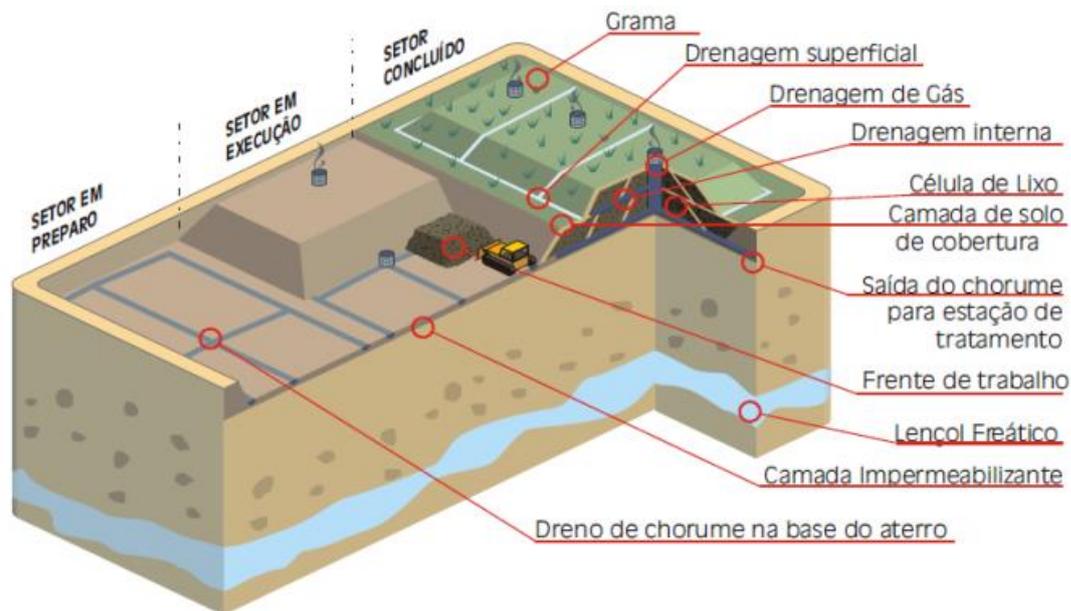


Figura 2 - Esquema de um aterro sanitário, com detalhamento de suas estruturas.
Fonte: Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia – CONDER (2021).



Figura 3 - Diferenças principais entre os Aterro Sanitário x Controlado.
Fonte: Recicla Club (2021).

Os aterros sanitários contam com um sistema de drenagem que abrange tanto a área periférica como a superficial, com o objetivo de coletar as águas pluviais e os líquidos percolados para encaminhá-los a processos de tratamento adequados. Além disso, possuem um sistema de captação de gases para prevenir

riscos como explosões, deslizamentos e combustão no local (Bidone; Povinelli, 2019; Falcão; Araujo, 2015).

O líquido percolado, também conhecido como lixiviado ou chorume de aterro sanitário, refere-se a um líquido viscoso e escuro que é gerado pela atividade enzimática dos microrganismos nos resíduos, pela oxidação química de metais e pela infiltração de água nos aterros sanitários. Sua composição química varia e depende do tipo de depósito de lixo (Massai, 2015). Segundo Baird et al. (2021), o líquido percolado é composto por ácidos orgânicos voláteis, bactérias, metais pesados, sais de íons inorgânicos comuns e compostos orgânicos voláteis mais comuns, o que o torna altamente prejudicial ao meio ambiente e à saúde da população.

A decomposição de resíduos sólidos em aterros sanitários resulta na emissão de gases como subproduto. Esses gases incluem dióxido de carbono (CO₂), gás sulfídrico e metano (CH₄), sendo o metano passível de ser coletado e utilizado para geração de energia (ENSINAS, 2013). Segundo Costa (2022), a conversão energética do biogás apresenta-se como uma solução para lidar com o grande volume de resíduos presentes nos aterros sanitários, pois além de reduzir o potencial tóxico das emissões de metano, ela gera energia elétrica e proporciona benefícios ambientais e financeiros.

Na Tabela 4, são apresentadas as vantagens e desvantagens associadas a essa forma de disposição.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens dos aterros sanitários

| Vantagens | Desvantagens |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Recebem os RSU praticamente da maneira como são recolhidos, através das estações de transbordo; • Dispõem o lixo de maneira adequada ambientalmente; • Geram biogás que pode ser capturado e aproveitado; • Exige a captura e o tratamento do “chorume”; • Emissão de carbono é distribuída no tempo, • uma vez que o ciclo de vida de um aterro é de em média 40 anos. | <ul style="list-style-type: none"> • Exige grandes áreas para implantação; • Impossibilita o uso da área por muitos anos após o fechamento do aterro; • Exige topografia adequada; • Provoca grande movimentação de terra e resíduos; • Gera menor quantidade de energia elétrica ao longo do tempo; • Após capacidade esgotada, exige ainda cuidados e manutenção por pelo menos 30 anos. |

Fonte: Adaptado pelo autor (2023).

2.2.

O lixão de Jardim Gramacho e suas particularidades

2.2.1.

Uma breve história sobre o Lixão de Jardim Gramacho

O Lixão de Jardim Gramacho foi um dos maiores e mais conhecidos depósitos de lixo a céu aberto da América Latina, ocupando uma área de 1,3 milhão de m², às margens da Baía de Guanabara no sub-bairro de Jardim Gramacho, em Duque de Caxias e operou por décadas como destino final dos resíduos sólidos produzidos na região metropolitana do Rio de Janeiro. Embora tenha sido implementado no ano de 1976 com a concepção de aterro sanitário, mas, tendo sido transformado em lixão. Ao longo dos anos, o Lixão de Jardim Gramacho se tornou um símbolo dos problemas enfrentados pelo país em relação à gestão inadequada de resíduos sólidos, tendo a sua operação causado uma série de impactos ao meio ambiente, na saúde das pessoas que viviam nas proximidades e na qualidade de vida da comunidade local. A poluição do ar, do solo e das águas subterrâneas, juntamente com a propagação de doenças e o aumento da criminalidade na área, foram alguns dos problemas associados à existência do lixão.

Além disso, a presença de catadores de materiais recicláveis, muitas vezes em condições de trabalho precárias, destacou as desigualdades sociais e econômicas existentes. Segundo Carvalho et al. (2012), o Lixão de Jardim Gramacho recebeu toneladas de resíduos diariamente, provenientes de diversas fontes, como residências, indústrias e comércios. O lixo era depositado de forma desordenada, sem qualquer tratamento ou controle adequado, o que resultou em sérios problemas ambientais e de saúde pública. A presença desse lixão causava grandes impactos no solo, na água e no ar. De acordo com Guerra et al. (2011), a decomposição dos resíduos orgânicos liberava gases como metano e dióxido de carbono, contribuindo para o aquecimento global e o efeito estufa. Além disso, o chorume gerado pela decomposição do lixo contaminava o solo e os recursos hídricos da região, representando uma ameaça à saúde da população e à biodiversidade local.

No entanto, em 2012, o Lixão de Jardim Gramacho foi finalmente desativado, marcando o fim de uma era de degradação ambiental e social. O fechamento do lixão foi resultado de esforços do governo e de organizações da sociedade civil, juntamente com a mobilização da comunidade local e de catadores

de materiais recicláveis. Entretanto, após o encerramento do lixão, iniciaram-se esforços de recuperação ambiental da área e de inserção social dos catadores por meio de programas de coleta seletiva e cooperativas de reciclagem, o que se mostrou deficiente ao longo dos anos. Embora ainda haja desafios a enfrentar, como a revitalização completa da área e a melhoria das condições de vida dos moradores locais, a recolocação e qualificação dos catadores, o fechamento do Lixão de Jardim Gramacho representou um passo importante em direção a uma gestão mais sustentável dos resíduos sólidos no Brasil. A desativação do Lixão de Jardim Gramacho foi um passo importante rumo a uma gestão mais adequada de resíduos. Os resíduos acumulados ao longo de décadas foram removidos, como mostrado na figura 4, que apresenta uma foto da entrada do lixão desativado. Esses resíduos foram transportados para aterros sanitários controlados, onde serão tratados.



Figura 4 - Entrada atual do Lixão Desativado de Jardim Gramacho.
Fonte: Arquivo pessoal do autor (2023).

2.2.2. Situação dos (ex) catadores

A indústria de reciclagem, muitas vezes, é apresentada, comprovadamente, como uma solução sustentável e economicamente viável para lidar com resíduos, porém é importante reconhecer que, na maioria dos casos, os catadores, que são a base dessa cadeia produtiva, não se beneficiam adequadamente dessa atividade. Os catadores desempenham um papel crucial na coleta e separação de materiais recicláveis, atuando na linha de frente e contribuindo, significativamente, para a redução do desperdício e a conservação de recursos naturais. No entanto, eles enfrentam, frequentemente, condições de trabalho precárias, baixos salários e falta de acesso a benefícios sociais e serviços básicos. Para garantir um horizonte sustentável e inclusivo na indústria de reciclagem, é essencial implementar políticas e práticas que valorizem e protejam os direitos dos catadores, tais como a formalização de sua atividade, o fornecimento de treinamento e equipamentos adequados, o estabelecimento de sistemas de seguridade social e a inclusão dos catadores em iniciativas de desenvolvimento econômico local. Trata-se de uma atividade sem reconhecimento profissional no mercado de trabalho formal, desvalorizada, insalubre, perigosa, penosa e sem respaldo de direitos do trabalho (Bastos, 2020).

Segundo um estudo gravimétrico realizado pela COMLURB revelou, cerca de 200 toneladas por dia de resíduos recicláveis eram recuperadas no lixão de Jardim Gramacho. Esses materiais recicláveis não apenas contribuíam para a redução do volume de resíduos enviados para aterros, mas também sustentavam uma economia local vibrante no sub-bairro de Jardim Gramacho, onde mais de 15.000 pessoas estavam envolvidas em atividades diretas de catação, e também indiretas, como serviços e comércio locais, impulsionando com isso um centro de subsistência e sustento para a maioria das famílias na região. No entanto, é importante reconhecer que o encerramento das atividades do lixão em 2012 teve um impacto significativo nessas comunidades e na economia local. Houve uma mudança drástica na vida dos catadores e suas famílias, que dependiam da catação de resíduos para subsistência e muitos perderam sua principal fonte de renda, deixando-os em uma situação de vulnerabilidade ainda maior. A necessidade de políticas públicas específicas, especialmente na área de Assistência Social, tornou-se urgente para apoiar essas comunidades durante a transição para uma nova realidade socioeconômica, incluindo, não apenas, assistência

financeira, mas também apoio na busca por novas formas de sustento e na melhoria das condições habitacionais. Muitos catadores já viviam em condições precárias, desde à época do funcionamento do Lixão, em barracos sem condições adequadas de salubridade no entorno do lixão e a falta de moradias dignas sempre foi e continua sendo um problema que necessita ser abordado de forma urgente, juntamente com a necessidade de encontrar alternativas de emprego e geração de renda para essas famílias. No entanto, a realidade mostrou que essas políticas e programas não foram suficientes para garantir uma transição suave e bem-sucedida para os catadores e suas famílias e muitos enfrentaram dificuldades para encontrar emprego ou fontes alternativas de renda, o que resultou no agravamento das condições sociais e no aumento da pobreza.

A situação dos catadores de Gramacho destaca a importância não apenas de fechar lixões e adotar práticas mais sustentáveis de gestão de resíduos, mas também de garantir apoio adequado e políticas sociais para aqueles que são afetados diretamente por essas mudanças. Isso envolve não apenas fornecer assistência imediata, mas também investir em programas de capacitação, desenvolvimento econômico local e melhoria das condições de vida para garantir uma transição justa e digna para todos os envolvidos.

Visando a continuidade das atividades por parte dos catadores do extinto lixão, um grupo de liderança dos catadores de Gramacho se mobilizou e conseguiu, o que seria uma grande conquista, a construção de um Polo de Reciclagem, que daria um passo significativo, não apenas para garantir trabalho e renda para os catadores, mas também para promover práticas mais sustentáveis de gestão de resíduos. O Polo de Reciclagem foi concebido como uma infraestrutura importante para processar e comercializar os resíduos recicláveis de forma mais organizada e eficiente. Com dois galpões destinados às etapas de recebimento, triagem, enfiamento e estocagem dos materiais recicláveis, o objetivo inicial era fornecer oportunidades de emprego para até 110 catadores, conforme mostra a figura 5. Essa visão era ambiciosa e refletia o desejo de proporcionar emprego e renda para uma quantidade significativa de pessoas na comunidade de Jardim Gramacho. No entanto, como muitas vezes acontece em projetos desse tipo, a realidade atual diverge das expectativas iniciais e durante a pesquisa pôde ser observado que um dos galpões opera com poucos catadores e no outro ao lado, apenas 02 trabalhadores

realizam uma espécie de segurança do local, a fim de evitar possíveis invasões ao local.



Figura 5 - Planta original do polo de reciclagem.

Fonte: https://g1.globo.com_ (2022).

3

Política Nacional de Resíduos Sólidos e os normativos decorrentes

3.1.

A Lei socioambiental e seus desdobramentos

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define os princípios, objetivos e instrumentos para a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos, incluindo os resíduos perigosos. Essa política estabelece diretrizes relacionadas à gestão integrada e ao manejo dos resíduos, bem como define as responsabilidades dos geradores e do poder público, além de aplicar instrumentos econômicos pertinentes. A PNRS introduz conceitos-chave, como acordos setoriais, logística reversa, inclusão dos catadores, coleta seletiva, adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo, e responsabilidade compartilhada. Essa legislação se aplica a todas as pessoas físicas e jurídicas, tanto de direito público quanto privado, que sejam responsáveis pela geração de resíduos sólidos e envolvidas em ações relacionadas à gestão integrada ou ao gerenciamento de resíduos sólidos (Brasil, 2012).

Em resumo, a Lei nº 12.305 tem como principais objetivos a redução, não geração, reutilização e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a destinação final adequada dos rejeitos de forma ambientalmente correta. Ela também busca incentivar o aumento da reciclagem, promover a inclusão social, minimizar o uso de recursos naturais na produção de novos produtos, fortalecer ações de educação ambiental e estimular a geração de emprego e renda para os catadores de materiais recicláveis (Frankenberg, 2021).

Com o objetivo de guiar as ações de toda a sociedade na gestão dos resíduos sólidos, a PNRS estabelece uma série de princípios no seu artigo 6º. Esses princípios incluem a prevenção e a precaução, que visam evitar danos ambientais; o princípio do poluidor-pagador e protetor-recebedor, que estabelece que aquele que gera resíduos é responsável por arcar com os custos de sua gestão adequada; a visão sistêmica na gestão dos resíduos, considerando as interações entre os diferentes elementos do sistema; o desenvolvimento sustentável, buscando

conciliar aspectos econômicos, sociais e ambientais; a ecoeficiência, promovendo a utilização eficiente dos recursos; a cooperação entre os setores público, empresarial e sociedade civil; a responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida dos produtos; o reconhecimento do valor econômico e social dos resíduos reutilizáveis e recicláveis; o respeito às diversidades locais e regionais; o direito da sociedade à informação e ao controle social; e o princípio da razoabilidade e proporcionalidade na tomada de decisões (Brasil, 2012).

A implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) deu origem a uma significativa mobilização institucional, envolvendo o governo federal, os estados, os municípios, o setor produtivo e a sociedade civil. Essa articulação busca encontrar soluções para os problemas decorrentes da gestão inadequada dos resíduos sólidos urbanos, que impactam significativamente a qualidade de vida da população. A discussão em torno dessa política marca o início desse processo, com o objetivo de promover a melhoria das condições ambientais e a preservação dos recursos naturais (Teixeira, 2018).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), fica proibida a criação de "lixões" e é estabelecida a necessidade de implementação de aterros sanitários para a destinação de resíduos que não podem ser reaproveitados ou decompostos. Nos aterros sanitários, é vedado catar lixo, morar ou criar animais. As prefeituras podem receber recursos para a criação de aterros sanitários que atendam aos critérios ambientais adequados. Além disso, a PNRS também proíbe a importação de qualquer tipo de resíduo (Frankenberg, 2021).

3.1.1.

Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos

A PNRS estabelece a obrigatoriedade de Estados e Municípios elaborarem os Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) como requisito para firmar convênios e contratos com a União visando ao repasse de recursos para programas relacionados à implementação da política. Esses planos têm como objetivo principal conciliar o crescimento econômico, a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável, abordando conceitos e propostas para diversos setores da economia. O PMGIRS tem vigência por prazo indeterminado e abrange um horizonte de 20 anos (Brasil, 2012).

Conforme estabelecido pela PNRS, a elaboração dos PMGIRS é uma condição necessária para que o Distrito Federal e os Municípios tenham acesso a recursos da União, controlados por ela, destinados a projetos e serviços relacionados à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos. Além disso, a elaboração dos PMGIRS também é um requisito para que essas entidades possam se beneficiar de incentivos ou financiamentos oferecidos por instituições federais de crédito ou fomento com o objetivo de promover a gestão adequada dos resíduos sólidos (Art. 18).

Conforme estabelecido pela Lei nº 12.305/2010, a gestão dos resíduos sólidos é de responsabilidade dos Municípios, uma vez que eles são os titulares dos serviços de interesse local. Portanto, cabe aos Municípios a obrigação de garantir a disposição ambientalmente correta dos resíduos sólidos, incluindo a eliminação dos lixões dentro do prazo determinado pela lei (Teixeira, 2018).

Diante desse contexto transformador, os municípios assumem uma missão social de extrema importância ao reestruturar suas práticas ambientais, sendo o prefeito o principal agente impulsionador dessa mudança. Nesse sentido, o prefeito tem a oportunidade de elevar sua cidade a um novo nível na gestão de resíduos, enfrentando diversas obrigações que devem ser cumpridas de acordo com as diretrizes da PNRS (SANEAS, 2018).

Conforme estabelecido pela PNRS, os municípios com menos de 20.000 habitantes têm a possibilidade de elaborar um Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) com um conteúdo simplificado. No entanto, é importante ressaltar que essa simplificação não se aplica aos municípios que se enquadram nas seguintes situações: integração em áreas de especial interesse turístico, inserção em áreas de influência de empreendimentos ou atividades com impacto ambiental significativo em âmbito regional ou nacional, e abrangência total ou parcial de Unidades de Conservação. Para esses casos específicos, o PMGIRS deve abranger informações mais abrangentes e detalhadas (PWC, 2018).

É de responsabilidade da administração pública municipal o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos, abrangendo desde a coleta até a sua disposição final de forma ambientalmente segura. Quando o resíduo não é devidamente coletado, acaba sendo descartado de maneira irregular em vias públicas, rios, córregos e áreas vazias, resultando em diversos impactos. Esses impactos incluem o assoreamento de corpos d'água, o entupimento de sistemas de drenagem e o consequente aumento

de enchentes durante períodos de chuva, além da degradação de áreas verdes e a propagação de odores desagradáveis, moscas, baratas e ratos. Essas consequências têm um impacto significativo na saúde pública, direta ou indiretamente (Jacobi; Besen, 2021).

Cada região ou município deve elaborar um plano regional ou municipal de acordo com as particularidades locais, levando em consideração o conteúdo mínimo estabelecido. Para isso, é importante considerar as características econômicas e socioambientais da localidade, a fim de compreender os tipos de resíduos sólidos gerados, como eles são tratados e qual a melhor forma de destinação adequada (Brasil, 2012). Além disso, é responsabilidade do município fornecer todas as informações sobre resíduos necessárias para que o órgão federal responsável possa manter o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) atualizado (Guia PNRS, 2020).

A partir de 2 de agosto de 2012, os municípios que desejam acessar recursos da União devem ter elaborado Planos de Gestão Integrada de Resíduos com um horizonte de 20 anos, sujeitos a revisão a cada 4 anos. No entanto, os municípios que optarem por soluções consorciadas entre municípios para a gestão dos resíduos sólidos ficam dispensados da elaboração do PMGIRS. Nesse caso, o plano intermunicipal deve seguir o conteúdo mínimo estabelecido no Art. 19 da Lei nº 12.305 (Brasil, 2012).

O segundo prazo estabelecido refere-se à disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em todo o território brasileiro, e foi estipulado até agosto de 2014. A partir desse prazo, todos os municípios deveriam encerrar a disposição final dos rejeitos em lixões, passando a adotar métodos adequados de disposição final. É de extrema importância ressaltar que a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabeleceu a meta de extinguir os lixões até o ano de 2014. No entanto, essa meta não foi completamente cumprida devido a uma série de desafios enfrentados pelos municípios brasileiros, como a falta de recursos financeiros, capacidade técnica e infraestrutura adequada para implementar alternativas adequadas de destinação de resíduos. Com o intuito de fornecer mais tempo e flexibilidade para que os municípios se adequassem às exigências da PNRS, o novo marco do saneamento, aprovado em 2020, redimensionou as datas para o encerramento dos lixões, levando em consideração o porte dos municípios. Isso significa que municípios menores podem ter prazos mais longos para cumprir

as metas estabelecidas pela legislação, enquanto os municípios maiores podem ter prazos mais curtos.

Essa abordagem visa reconhecer as diferenças de capacidade e realidade entre os municípios brasileiros e fornecer um cronograma mais realista e factível para a implementação das medidas necessárias para a gestão adequada de resíduos sólidos. No entanto, é importante garantir que esses prazos estendidos não se tornem uma desculpa para a inação ou complacência por parte das autoridades municipais, e que os esforços para acabar com os lixões e promover práticas sustentáveis de gestão de resíduos continuem sendo uma prioridade em todo o país. Foi estendido o prazo final, em que as capitais e municípios de região metropolitana tiveram até 31 de julho de 2018 para realizar a disposição adequada de seus rejeitos. As cidades com população entre 50 e 100.000 habitantes tiveram prazo até 31 de julho de 2020, e as cidades com menos de 50.000 habitantes tiveram até 31 de julho de 2021 para cumprir essa exigência.

No caso do município de Duque de Caxias, somente em 02 de março de 2020, através do Decreto nº 7.517, foi instituído o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Duque de Caxias (PMGIRS).

3.1.2. A desativação dos lixões

O encerramento das atividades de um lixão não resolve todos os problemas associados a ele. A produção de chorume, por exemplo, pode continuar por muitas décadas (Possamai et al., 2017). A situação da disposição final de resíduos no Brasil é preocupante, e é necessário que os lixões sejam recuperados e equipados com tecnologia adequada para a extração de gases. Além disso, é importante minimizar os impactos ambientais por meio do tratamento do líquido percolado e da implementação de monitoramento ambiental. Os aterros sanitários devem ser planejados, licenciados, construídos, operados e monitorados com tecnologia avançada (Felipetto, 2017).

A remediação e o encerramento de lixões consistem em um processo que visa minimizar ao máximo os impactos ambientais causados pela disposição de resíduos, levando em consideração a decisão de encerrar as operações no local, estabilizar a área e destiná-la a um uso adequado no futuro. Ao desativar um lixão ou mesmo

um aterro sanitário, o objetivo é estabilizá-lo do ponto de vista físico, químico e biológico. Após essa estabilização, que geralmente ocorre após um período de 10 a 15 anos desde o encerramento da deposição de resíduos, busca-se destinar a área a um uso compatível (D'Almeida, 2022).

Os lixões estão sendo progressivamente substituídos por Unidades de Triagem e Compostagem e Aterros Sanitários. No entanto, a desativação de áreas ocupadas por lixões muitas vezes ocorre sem critérios técnicos adequados, resultando apenas no encerramento da disposição de resíduos no local, seguido pelo fechamento e abandono da área (Lanza, 2020).

As áreas que foram utilizadas para a disposição de resíduos, mesmo após serem desativadas, sofrem consequências decorrentes da deposição inadequada de toneladas de lixo ao longo dos anos. O solo nessas áreas pode reter substâncias químicas presentes nos resíduos industriais e no chorume, as quais podem ser absorvidas pelas plantas. Portanto, não é recomendado utilizar essas áreas para cultivo de alimentos (Sisinno, 2020).

De acordo com Possamai et al. (2017), uma das formas atualmente mais adequadas para desativar um lixão é remover a massa de lixo e transferi-la para um aterro sanitário, em seguida recuperar a área escavada utilizando solo natural da região. No entanto, esse processo envolve custos elevados. Uma abordagem mais econômica para minimizar os impactos ambientais na remediação e fechamento de lixões inativos é seguir uma sequência de medidas, como extinguir o fogo e a fumaça, limpar a área, realizar uma cobertura final, drenar as águas superficiais, coletar e tratar o biogás e o percolado do lixo, realizar monitoramento geotécnico e ambiental, fazer a manutenção das estruturas do aterro, desenvolver um projeto paisagístico e planejar o uso futuro da área.

3.2.

Os Impactos gerados pelos lixões desativados e as possibilidades de aproveitamento energético

Segundo Fogliatti, Filippo e Goudard (2014), o impacto ambiental refere-se a qualquer modificação nas características físicas, químicas e/ou biológicas do meio ambiente, causada direta ou indiretamente por atividades humanas, que pode afetar

a saúde, a segurança e/ou a qualidade dos recursos naturais. Quando esses impactos são significativos, podem levar à degradação ambiental.

Os lixões apresentam diversas consequências problemáticas devido às suas características. Eles podem ser responsáveis pela proliferação de vetores de doenças, tanto de grande porte, como cachorros, gatos, ratos, urubus e pombos, quanto de pequeno porte, como moscas, mosquitos, bactérias e fungos. Além disso, os lixões podem gerar problemas ambientais, incluindo a poluição do ar, a contaminação das águas superficiais e subterrâneas, a degradação do solo, bem como afetar a paisagem local. Essas questões foram relatadas por Sissino (2020) e D'Almeida (2020).

Após o encerramento dos lixões e o fechamento da área, as atividades dos catadores e o trabalho infantil são interrompidos. No entanto, é importante destacar que a geração de gases, chorume e odores persiste enquanto houver atividade biológica no interior do montante de resíduos. Isso pode resultar na poluição do ar e das águas, bem como causar problemas de instabilidade no terreno e degradação do solo. Essas questões foram abordadas pela FEAM (2018).

Conforme mencionado por D'Almeida (2022), nos lixões, o chorume, resultante da decomposição da matéria orgânica presente no lixo, é o principal elemento causador de impacto ambiental. Devido à ausência de revestimento impermeável no fundo dos lixões, todo o chorume gerado é absorvido pelo solo, o que aumenta o risco de contaminação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Após ser desativado, um lixão continua a produzir chorume por um período prolongado, contrariando a crença de que a remediação dos taludes, a cobertura com camadas de terra e a instalação de coletores de gases tornam esse método de disposição menos perigoso para a saúde pública e para o meio ambiente. A geração de chorume pode estender-se por mais de 15 anos após o encerramento da deposição de resíduos, dependendo de diversos fatores. Um exemplo disso é um aterro localizado na cidade de São Paulo, que, mesmo após mais de 15 anos, acumula diariamente cerca de 500 mil litros de chorume (Rodrigues; Gravinatto, 2017).

Conforme apontado por Xiaoli et al. (2017), um dos principais problemas relacionados à disposição de resíduos em aterros é a presença de altos níveis de metais pesados no solo e na vegetação. Metais como níquel (Ni), cobre (Cu), zinco (Zn), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e cromo (Cr) são encontrados em diversos tipos

de resíduos, como lâmpadas, pilhas, baterias, restos de tintas, latas e outros produtos tóxicos. Esses metais pesados representam uma preocupação ambiental devido ao seu potencial de contaminação e impactos gerados na saúde humana e nos ecossistemas.

O acúmulo de metais pesados no solo representa um risco de contaminação da cadeia alimentar e dos seres vivos, como destacado por Oliveira e Jucá (2014) e Pradeep et al. (2015). Esses metais podem ser lixiviados no solo, o que significa que podem se mover através da água percolada e contaminar o lençol freático. Esse processo de lixiviação é uma preocupação adicional, pois pode resultar na contaminação de recursos hídricos subterrâneos, aumentando os riscos ambientais associados aos metais pesados.

Apesar de o chorume e os gases serem as principais preocupações resultantes da decomposição do lixo após o fechamento dos lixões, existem outros problemas relacionados à sua disposição que podem surgir. Isso inclui a emissão de odores desagradáveis, a possibilidade de incêndios, a desvalorização dos imóveis nas proximidades, a presença de animais e insetos indesejados no local, bem como a degradação da qualidade do solo. É importante abordar essas questões e implementar medidas adequadas de gestão de resíduos para evitar ou minimizar esses impactos, garantindo um ambiente saudável e sustentável.

A Figura 6 apresenta uma representação visual dos diversos impactos que podem ocorrer devido à disposição de resíduos sólidos em lixões a céu aberto.



Figura 6 - Impactos da disposição de resíduos sólidos em vazadouros a céu aberto.
Fonte: Fundação Estadual de Meio Ambiente – FEAM (2018).

A fim de reduzir os impactos ambientais destacados na Figura 6, é essencial implementar medidas técnicas de proteção ambiental nas áreas de disposição final de resíduos sólidos. Essas medidas são conhecidas como métodos de remediação, conforme mencionado por Possamai et al. (2017).

3.3. Possibilidades de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos

A utilização de tecnologias para a geração de energia a partir de resíduos sólidos não é um tema novo porém tem um ganho a mais a partir da atenção empenhada nos últimos anos, devido à crescente preocupação com a gestão inadequada de resíduos, a fim da necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e o impulso em direção a fontes de energias renováveis. Conforme discutido por Silva-Martínez et al. (2020), tem havido um crescente interesse e pesquisa em métodos acessíveis de aproveitamento energético dos resíduos, levantando discussões sobre tecnologias bioquímicas e termoquímicas que podem suprir a demanda por energia. Como destacado pelo estudo de Silva-Martínez et al. (2020), a pesquisa contínua e o desenvolvimento de tecnologias acessíveis e eficientes são fundamentais para maximizar o aproveitamento energético dos resíduos sólidos e promover uma transição para um modelo de economia circular e de baixo carbono. Essas tecnologias têm o potencial não apenas de suprir a demanda por energia, mas também de contribuir para a redução dos impactos ambientais associados à gestão de resíduos sólidos. Nos últimos anos, vários estudos têm analisado aspectos técnicos, ambientais e econômicos de diferentes tecnologias de conversão de resíduos em energia, como a Waste-to-Energy, buscando comparar seu desempenho para a produção de bioenergia (Silva-Martínez et al., 2020).

No período compreendido entre 2010 e o presente, que coincide com a publicação da PNRS e, as pesquisas têm dado uma significativa atenção aos potenciais energéticos dos resíduos agrícolas e seus principais efluentes. Em menor medida, também têm sido estudados os resíduos industriais. Posteriormente, houve um redirecionamento para o estudo dos efluentes provenientes de tratamentos sanitários e, mais recentemente, um foco no estudo dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

Diversos estudos têm realizado comparações entre diferentes tecnologias de aproveitamento energético, buscando fornecer uma base sólida para a tomada de decisões na gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Essas pesquisas têm comparado a disposição final em aterro sanitário com tecnologias como aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários, incineração dos resíduos, biodigestão anaeróbia da fração orgânica e reciclagem, além de suas combinações. Alguns estudos, como o de De Souza et al. (2014), destacam o maior potencial energético da incineração dos RSU no município de São Paulo, com base em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Por outro lado, Goulart Coelho e Lange (2018) consideram promissores os cenários de recuperação por meio da reciclagem e biodigestão anaeróbia como estratégias para o município do Rio de Janeiro. Já Mersoni e Reichert (2017) sugerem a associação das tecnologias de incineração, compostagem e biodigestão anaeróbia da fração orgânica com a reciclagem como estratégia essencial para o município de Garibaldi, no Rio Grande do Sul.

3.3.1. Termoquímica

Os processos de conversão termoquímica são utilizados para aproveitar o conteúdo energético dos resíduos por meio de tratamentos térmicos em alta temperatura. A escolha do combustível determina o tipo de processo a ser adotado (World Energy Council, 2013). Neste estudo, foram analisadas as rotas tecnológicas da incineração e da gaseificação. A incineração é a rota mais amplamente estudada devido à sua longa história de utilização e à relativa simplicidade do processo em comparação com outras tecnologias termoquímicas.

No entanto, a gaseificação tem recebido crescente atenção nos últimos anos devido aos seus potenciais ambientais, econômicos e de flexibilidade no uso do combustível produzido, conhecido como *syngas*. Estudos científicos relacionados às tecnologias de pirólise não foram considerados devido à falta de dados disponíveis para calcular o potencial energético e à ausência de exemplos dessa tecnologia em território nacional.

As rotas tecnológicas mencionadas baseiam-se em regulamentações específicas. A Portaria Interministerial nº 274/2019 disciplina a recuperação

energética dos resíduos sólidos urbanos, conforme previsto na Lei nº 12.305/2010 e no Decreto nº 7.404/2010. Essa portaria define a Usina de Recuperação Energética de RSU (URE) e estabelece os tipos de resíduos passíveis de serem encaminhados para esse tipo de usina, incluindo resíduos de limpeza urbana e resíduos domiciliares. Além disso, são estabelecidas diretrizes operacionais a serem seguidas (Ministério do Meio Ambiente, 2019).

Já a Resolução Estadual SMA nº 79/2009 define diretrizes e condições para a operação e licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia (URE). Essa resolução estabelece condições operacionais, limites de emissão, critérios de controle e monitoramento a serem seguidos (Secretaria de Estado do meio Ambiente de São Paulo, 2009).

3.3.1.1. Incineração

A incineração é um processo de tratamento térmico de resíduos sólidos que envolve a queima do lixo e a recuperação de energia térmica gerada durante o processo (Grynwald, 2014). Esse método é utilizado para reduzir o volume de resíduos e aumentar a vida útil dos aterros sanitários (Polzer, 2013). A incineração passou por melhorias ao longo dos anos e é considerada um sistema confiável, com capacidade de gerar energia, neutralizar gases tóxicos e apresentar um controle operacional moderno. Seu objetivo é complementar os processos de reciclagem, compostagem e aterramento (Polzer, 2013).

No entanto, existem desvantagens associadas a esse método, especialmente em relação às emissões de gases tóxicos. Essas emissões incluem gases ácidos, como SO_x, HCl, HF, NO_x, e compostos orgânicos voláteis, como hidrocarbonetos poliaromáticos, bifenilos policlorados, dioxinas e furanos, além de metais pesados tóxicos que podem ser lixiviáveis (HE et al., 2019). Para lidar com esses gases nocivos, é necessário o uso de sistemas de lavagem de gases, que podem ocupar uma parte significativa das usinas e representar até 35% dos custos totais (Muniz, 2015).

O *Mass Burning* é um conceito de recuperação térmica amplamente utilizado em todo o mundo para tratar resíduos sólidos urbanos (RSU) e aproveitar seu conteúdo energético. Nesse processo, os RSU são descarregados em um fosso

de armazenamento sem a necessidade de pré-tratamento. Em seguida, são dosados no sistema de alimentação das caldeiras ou fornos para serem incinerados com o excesso de oxigênio. Isso gera gases quentes que trocam calor com as paredes dos tubos em uma caldeira, resultando na produção de vapor em alta pressão e temperatura.

Esse vapor pode ser usado para fins térmicos ou alimentar conjuntos de turbinas e geradores para geração de energia elétrica. Os sistemas de queima mais comumente empregados são o de Grelhas Móveis e o de Leito Fluidizado (Comitê de Valoração Energética, 2022).

Conforme destacado por Santos et al. (2019), a tecnologia de incineração é adequada para o tratamento de materiais com alto potencial calorífico, tais como papel e papelão, plásticos, matéria orgânica, tecidos, couro e madeira (Santos et al., 2019). Além disso, a incineração tem o potencial de reduzir o volume dos resíduos sólidos em até 95% (Cheremisinoff; Rosenfeld, 2020).

3.3.1.2 Gaseificação

A gaseificação é um processo que converte, total ou parcialmente, matéria orgânica em gases, sendo os principais componentes o monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor de água em proporções variadas. Essa tecnologia possui potencial de aplicação nos resíduos sólidos urbanos, uma vez que esses resíduos representam uma fonte de baixo custo de biomassa, incluindo resíduos de madeira e resíduos sólidos municipais, que podem ser utilizados para a produção de combustível gasoso (Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2016).

De acordo com Miranda (2014), existem diferentes tipos de gaseificadores, classificados com base no comportamento do leito onde a matéria a ser gaseificada é colocada. O gaseificador de leito fixo é o mais difundido e implementado, principalmente em pequena escala. Já o gaseificador de leito fluidizado é mais adequado para a conversão de maiores quantidades de biomassa (Miranda, 2014).

A gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) apresenta vantagens em termos de redução e prevenção de corrosões e emissões. Esse processo retém metais

pesados, alcalinos (exceto mercúrio e cádmio), enxofre e cloro nos resíduos resultantes, evitando sua liberação no ambiente (He et al., 2019). Além disso, a gaseificação contribui para evitar a formação de policlorados dibenzo-p dioxina/furanos, compostos químicos tóxicos.

Outra vantagem é a redução da formação térmica de óxidos de nitrogênio (NOx) devido às baixas temperaturas e às condições de redução presentes no processo de gaseificação (He et al., 2019). Esses benefícios ambientais são importantes para mitigar os impactos associados aos resíduos sólidos urbanos.

Lopes et al. (2018) conduziram um estudo que explorou a gaseificação como estratégia para a produção de *syngas* visando a geração de energia elétrica. O objetivo foi avaliar o potencial energético obtido por meio da segregação dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Foi observado que resíduos com alto teor de umidade podem prejudicar a recuperação energética durante o processo de gaseificação, uma vez que a secagem requer uma quantidade significativa de energia. Estima-se que o consumo de energia durante a etapa de secagem possa chegar ao dobro do potencial energético, considerando uma eficiência de segregação de 90% (Lopes et al., 2018).

Estudos laboratoriais, como o realizado por He *et al.* (2019), e experimentos em escala comercial, como o apresentado pela Empresa ENERGOS, conforme Del Alamo et al. (2022), fornecem informações sobre a influência dos parâmetros do processo de gaseificação, como temperatura e tipo de sistema, assim como da composição dos RSU, na qualidade do *syngas* produzido (Del Alamo et al., 2022; He et al., 2019). Essas pesquisas destacam a importância de considerar esses fatores para otimizar a produção de *syngas* e maximizar o aproveitamento energético dos RSU.

No Brasil, existe um projeto piloto que utiliza a tecnologia de gaseificação. De acordo com o estudo de viabilidade realizado por Infiesta (2015) sobre o Projeto CIVAP (Consórcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema) em São Paulo, a empresa Carbogas Ltda. implementou uma Planta Piloto de gaseificação de leito fluidizado. A planta possui uma potência térmica instalada de 1 MWth, sendo capaz de gerar 741 Nm³/h de gás combustível com um poder calorífico inferior (PCI) de 1.160 kcal/Nm³. Além disso, o consumo de resíduos nessa planta é de até 325 kg/h, com um poder calorífico inferior de 3.500 kcal/kg (Infiesta, 2015). Esses dados

demonstram a capacidade e eficiência da planta piloto na produção de gás combustível a partir da gaseificação de resíduos.

3.3.2. Bioquímica

Nos processos bioquímicos, é possível converter o conteúdo energético de uma fonte primária por meio da bio-decomposição de resíduos, gerando combustíveis ricos em energia que podem ser utilizados para diversos fins (World Energy Council, 2013). Duas rotas estudadas nesse contexto são a biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e a disposição dos RSU em aterros sanitários, sendo essas rotas historicamente empregadas.

A biodigestão anaeróbia da fração orgânica tem sido objeto de muitas pesquisas devido ao seu potencial de recuperação energética, tanto em pequena escala para resíduos provenientes de restaurantes ou feiras, quanto em larga escala para os RSU gerados nas cidades. A recuperação do biogás nos aterros sanitários também tem sido objeto de estudos, com dois focos principais: o potencial de aproveitamento dos gases gerados nos aterros e sua viabilidade econômica, incluindo a possibilidade de venda de créditos de carbono. Além disso, há pesquisas comparando essa rota com outras opções de recuperação energética, considerando também os impactos da recuperação de materiais recicláveis dos RSU (World Energy Council, 2013).

3.3.2.1. Biodigestão Anaeróbia da Fração Orgânica do RSU

A Biodigestão Anaeróbia é um processo que envolve a decomposição da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio (O_2), ocorrendo em um sistema fechado chamado de biodigestor (Lima, 2014). Durante esse processo, microrganismos degradam a matéria orgânica, produzindo biogás como resultado da digestão anaeróbia. Esse biogás é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), podendo ser utilizado como fonte de energia renovável.

A co-digestão de resíduos alimentares, lodo de esgoto e glicerol bruto é uma estratégia que visa maximizar a produção de energia, especialmente hidrogênio e metano, em um sistema de duas etapas conhecido como acidogênese-

metanogênese, conforme definido por Silva et al. (2018). Ao combinar esses diferentes tipos de resíduos orgânicos, é possível aumentar as taxas de produção de gases combustíveis, resultando em uma maior eficiência energética. Além disso, Náthia-Neves et al. (2018) sugerem a utilização de uma combinação de resíduos alimentares com vinhaça, um subproduto da indústria de etanol, como uma possível rota para a produção de hidrogênio e metano. Essas abordagens mostram o potencial de aproveitamento energético por meio da co-digestão de diferentes materiais orgânicos.

A biodigestão anaeróbia é uma tecnologia flexível que pode ser aplicada em diferentes escalas, incluindo pequenas escalas, como demonstrado por Kuczman et al. (2018). Eles desenvolveram um protótipo de um digestor anaeróbio de fase única em pequena escala para um restaurante popular em Cascavel, PR. O estudo destacou a importância da qualidade do resíduo orgânico para a eficiência do sistema, particularmente na redução dos sólidos voláteis, demanda química orgânica e produção de metano.

Esses resultados estão em consonância com as descobertas de Silva et al. (2018), que identificaram a relação entre as características químicas da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos de Santo André, SP, como a presença de lipídeos e a composição proteica, e o processo de biodigestão. Essas pesquisas destacam a importância de considerar a composição e qualidade dos resíduos orgânicos ao projetar e operar sistemas de biodigestão anaeróbia.

O estudo conduzido por Ferreira et al. (2018) explorou a aplicação em larga escala de um sistema de metanização extra-seco para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no município do Rio de Janeiro, RJ. Esse sistema foi dimensionado para tratar 23,5 toneladas por dia de RSU, gerando uma produção diária de 2.613 Nm³ de biogás. Essa quantidade de biogás permitiu que a planta se tornasse autossuficiente e ainda gerasse excedente energético para a rede elétrica e para abastecer a frota de caminhões de transbordo.

Essa abordagem resultou em benefícios econômicos e ambientais, reduzindo a dependência de energia elétrica da rede e do consumo de combustível diesel. Esse estudo demonstra o potencial da metanização em larga escala como uma alternativa viável para o tratamento de RSU, proporcionando a geração de energia renovável e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

3.3.2.2. Disposição de RSU em Aterro Sanitário

A recuperação energética do biogás em aterros sanitários é um processo importante para aproveitar o potencial energético dos gases gerados durante a decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos aterrados. De acordo com o estudo de Da Paz et al. (2015), estima-se que, no Estado de Pernambuco, entre os anos de 1990 e 2005, foram geradas aproximadamente 376.000 toneladas de metano (CH₄) a partir dos aterros sanitários. Essa quantidade de metano representa um potencial significativo para a venda de créditos de carbono, estimado em cerca de 50 milhões de dólares ao longo de 15 anos. Esse valor demonstra a importância da recuperação do biogás em aterros sanitários não apenas como uma fonte de energia renovável, mas também como uma oportunidade para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e obter benefícios financeiros por meio da venda de créditos de carbono.

De acordo com De Gomes et al. (2015), a recuperação energética do biogás em aterros sanitários é influenciada por várias variáveis. Eles realizaram uma análise utilizando lógica fuzzy para determinar a sustentabilidade de aterros, com destaque para o aterro Bandeirantes, localizado no município de São Paulo. Os critérios técnicos considerados incluem a presença de oxigênio no solo, o tipo e granularidade do solo, a distribuição de água em diferentes partes do aterro, além da granulometria e volume dos resíduos sólidos urbanos (RSU), que são utilizados para calcular a produção de metano.

Por sua vez, Candiani e Moreira (2018) conduziram um estudo experimental em uma região subtropical do Estado de São Paulo, no qual calcularam a produção de metano. Os resultados indicaram uma possível redução na longevidade dos projetos de aproveitamento energético do metano em aterros sanitários localizados em regiões tropicais e subtropicais.

Embora não tenham levado em consideração todas as variáveis, como custos de transporte e destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), critérios ambientais e custo do terreno, Santos et al. (2019) realizaram análises energéticas e econômicas para avaliar a viabilidade da recuperação de energia a partir do biogás gerado em aterros sanitários. Utilizando parâmetros como Valor Presente Líquido e Custo Nivelado de Energia Elétrica, os resultados indicaram que a recuperação de

energia do biogás do aterro é economicamente viável, ao contrário da metanização da fração orgânica por meio de digestores anaeróbios e da combustão em incineradores.

No entanto, Leme et al. (2022) afirmam que os sistemas de aterros sanitários são as opções menos favoráveis economicamente para a gestão de resíduos, comparados à incineração. Além disso, do ponto de vista ambiental, esses sistemas apresentam um potencial de geração de gases de efeito estufa, acidificação, eutrofização e toxicidade. Em outro estudo, Dalmo et al. (2019a) também destacam que os aterros sanitários no Estado de São Paulo têm um potencial teórico anual menor para geração de energia em comparação com outras tecnologias, como incineração, gaseificação e digestão anaeróbia, tanto isoladas quanto combinadas. Além disso, essa tecnologia apresenta uma alta porcentagem de ar, o que reduz o seu poder calorífico e exige custos extras para o seu tratamento.

3.3.3. Síntese das Tecnologias de Aproveitamento Energético

Conforme discutido, as quatro tecnologias mencionadas têm suas vantagens e desvantagens, e a escolha entre elas requer a consideração de critérios específicos para tomar uma decisão adequada. Como apontado por Dalmo et al. (2019), o potencial energético das diferentes tecnologias e suas combinações possíveis podem influenciar o planejamento e a implementação de soluções mais adequadas de acordo com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Dalmo et al., 2019b).

4

O caso do Lixão de Jardim Gramacho e as possibilidades de aproveitamento energético

4.1.

Conhecendo o campo de pesquisa e suas potencialidades

O trabalho teve como proposta metodológica o estudo de caso, onde buscou-se investigar a gestão dos RSU no Lixão desativado de Jardim Gramacho e as tecnologias de aproveitamento energético existentes, traçando possibilidades de redes e arranjos que apresentem maior alinhamento aos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), contando com as seguintes etapas de execução para atendimento dos objetivos definidos: caracterização do estudo de caso; revisão bibliográfica; coleta de dados; análise crítica e sistematização dos dados. As visitas ao sub-bairro de Jardim Gramacho foram fundamentais para compreender melhor esse contexto e constatar a existência de lixões clandestinos, conforme mostrado na figura 7.



Figura 7 - Exemplo de lixão clandestino localizado próximo à entrada ao lixão desativado de Jardim Gramacho.

Fonte: Arquivo pessoal do autor (2023).

4.1.1. Estudo de Caso

Essa abordagem de pesquisa é frequentemente utilizada em áreas como administração pública, estudos organizacionais e planejamento regional e municipal. É a estratégia preferida quando se investigam eventos contemporâneos nos quais não é possível manipular comportamentos relevantes.

O estudo de caso é caracterizado por uma investigação aprofundada e abrangente de um ou poucos objetos, visando obter um conhecimento amplo e detalhado que não seria possível por meio de outros tipos de delineamentos (Gil, 2018). De acordo com Yin (2001), o estudo de caso é uma pesquisa empírica que investiga um fenômeno contemporâneo em um contexto real, sem uma distinção clara entre o fenômeno e o contexto (Yin, 2001). As evidências podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa, provenientes de trabalho de campo, registros de arquivos, relatórios verbais, observações ou uma combinação desses elementos (Yin, 2001). No entanto, conforme observado por Gil (2018), há certos preconceitos contra o estudo de caso (Yin, 2001 apud Gil, 2018):

- Falta de rigor metodológico: ao contrário dos experimentos e levantamentos, o estudo de caso não possui procedimentos metodológicos rigidamente definidos;
- Dificuldade de generalização: a análise de um único caso ou até mesmo de múltiplos casos oferece uma base limitada para generalizações;
- Tempo dedicado à pesquisa: é argumentado que os estudos de caso exigem um tempo significativo para serem concluídos e que, frequentemente, seus resultados podem ser inconsistentes.

De fato, Yin (2001) contesta esses argumentos ao afirmar que cabe ao pesquisador realizar um trabalho minucioso na apresentação de todas as evidências de forma imparcial. O objetivo do estudo de caso é ampliar e generalizar teorias por meio de generalização analítica, ao invés de contar frequências por meio da generalização estatística. Yin ressalta que o estudo de caso é uma forma de investigação que não depende exclusivamente de dados etnográficos ou de observadores participantes.

A escolha do estudo de caso reflete a natureza exploratória desse tipo de pesquisa, que tem como objetivo fornecer uma maior compreensão do problema,

tornando-o mais evidente ou construindo hipóteses (Gil, 2018). De acordo com Vianna (2022), as pesquisas exploratórias têm como principal propósito fornecer esclarecimentos sobre um determinado tema que ainda é pouco explorado.

4.1.2. Revisão da Literatura

A revisão da literatura é uma pesquisa que se baseia em materiais já existentes, como livros e artigos científicos. Sua principal vantagem está no fato de permitir que o pesquisador abranja uma ampla gama de fenômenos que poderia ser difícil de investigar diretamente (Gil, 2018). Ao explorar o conhecimento acumulado em trabalhos anteriores, a revisão da literatura possibilita uma compreensão mais abrangente do tema em questão.

O estado atual da caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e das tecnologias de aproveitamento energético para RSU foi investigado utilizando a metodologia de revisão da literatura conhecida como *Archival Method Research* (ARM). Essa abordagem, de acordo com Dewayne et al. (2013), consiste na análise de dados previamente registrados, originalmente gerados para outros propósitos (Dewayne et al., 2013). Para realizar essa revisão, foram utilizadas as bases de dados Scopus e Scielo, aplicando filtros para selecionar artigos publicados a partir de 2015 (ano de publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS) e que se referiam especificamente ao contexto brasileiro. Além disso, foram excluídos os artigos que abordavam o estado da arte do tema, focando apenas na caracterização e nas tecnologias de aproveitamento energético dos RSU.

A análise e conceituação das redes e arranjos foram realizadas por meio de uma revisão bibliográfica em três etapas. A primeira etapa consistiu na análise do histórico de conceituação do termo "redes", com foco especial nas redes urbanas e geográficas, com base nos estudos de Santos (2006), Pereira e Kahil (2016), Pereira (2019) e Corrêa (2021). A segunda etapa envolveu a descrição das redes técnicas de resíduos sólidos, resultantes das diversas atividades humanas em um determinado território, com base no estudo de Fiore (2013). Por fim, a terceira etapa compreendeu a síntese dos modelos de gestão dos resíduos sólidos e dos arranjos institucionais subjacentes, utilizando como referência o estudo de Gambi (2018). Essa revisão bibliográfica permitiu a compreensão dos conceitos e das abordagens

teóricas relacionadas às redes e arranjos, proporcionando uma base sólida para a análise e o desenvolvimento do estudo.

4.1.3. Coleta de Dados

Para a coleta de dados deste estudo, foram adotadas estratégias e técnicas com o objetivo de obter informações relevantes e abrangentes, sendo a principal delas a revisão bibliográfica. Adicionalmente, houve conversas informais com representantes da área de resíduos sólidos urbanos e com representantes de associação de catadores, visando compreender melhor a área estudada.

A análise documental de relatórios, planos municipais de gestão de resíduos sólidos, legislações pertinentes e outros materiais relacionados ao tema desempenhou um papel fundamental na condução do estudo. Essa abordagem permitiu acessar informações importantes sobre políticas públicas, regulamentações e práticas existentes no contexto da gestão de resíduos sólidos, conforme indicado por Gil (2018).

Outra fonte de dados foi a observação direta, realizada através de visitas a diversas instalações de tratamento e disposição de resíduos sólidos, como aterros sanitários e usinas de recuperação energética. Durante essas visitas, foram registradas observações sobre as tecnologias empregadas, o funcionamento das instalações, o estado atual do Polo de Reciclagem, conforme mostrado na figura 8, e outros aspectos relevantes para o estudo. Essa revisão abrangeu artigos científicos, dissertações, teses e relatórios técnicos que abordam o tema da recuperação energética de resíduos sólidos.

A escolha dessas diferentes técnicas de coleta de dados foi fundamentada na necessidade de abordar o problema de pesquisa de forma abrangente, considerando múltiplas perspectivas e fontes de informação. Conforme ressaltado por Marconi e Lakatos (2017), a combinação de diferentes técnicas de coleta de dados contribui para a triangulação dos resultados, aumentando a confiabilidade e a validade do estudo.

Os dados coletados foram registrados e analisados de acordo com as diretrizes da análise de conteúdo, que envolveu a categorização e a codificação dos dados para identificar temas e padrões recorrentes. Essa abordagem analítica foi

adotada com o objetivo de identificar as principais tendências, desafios e oportunidades relacionados à recuperação energética de resíduos sólidos.

É importante destacar que todos os procedimentos adotados para a coleta de dados seguiram rigorosos critérios éticos e de confidencialidade, garantindo o anonimato dos participantes das conversas realizadas e o uso responsável das informações coletadas, em conformidade com as diretrizes éticas de pesquisa (Marconi; Lakatos, 2017).

Para obter uma compreensão mais abrangente do funcionamento da reutilização de resíduos sólidos para a geração de energia, foram realizadas comparações com outros lixões e aterros sanitários em diferentes regiões do país. Essas comparações permitiram identificar práticas, desafios e oportunidades relacionadas ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos. Ao analisar casos semelhantes, foi possível extrair lições e *insights* relevantes para o desenvolvimento de estratégias e políticas mais eficazes no contexto do estudo em questão.



Figura 8 - Exemplo de Galpão de Polo de Reciclagem existente em Jardim Gramacho.
Fonte: Arquivo pessoal do autor (2023).

4.1.4. Análise crítica e sistematização dos dados

A análise dos dados envolve a avaliação minuciosa das evidências coletadas, que podem ser examinadas, categorizadas, classificadas em tabelas ou reorganizadas de outras maneiras, com o objetivo de explorar as proposições iniciais do estudo (Yin, 2001).

Com base nos conceitos e modelos de redes e arranjos apresentados na revisão da literatura, foram estabelecidos dois cenários para o estudo: o primeiro é o cenário "*business as usual*" (BAU), que representa a rede técnica atual do município de Duque de Caxias; o segundo é o cenário Brasil, que representa a rede técnica idealizada para algumas região (Yin, 2001).

Os dados relacionados à geração de resíduos sólidos, a composição gravimétrica desses resíduos, os modelos de gestão adotados pelos municípios e os custos associados foram comparados com informações socioeconômicas a fim de identificar tendências. Para isso, foi feita uma projeção com base na taxa de geração mais recente disponível e na Taxa Geométrica de Crescimento Populacional fornecida pela Fundação Seade. Quanto aos dados gravimétricos, utilizaram-se as informações disponíveis nos Planos Municipais de Resíduos Sólidos e nos Consórcios. Para estimar os custos, quando necessário, recorreu-se ao Índice de Preços ao Consumidor (IPC) da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas de São Paulo (FIPE/SP).

Os cálculos realizados para determinar o potencial energético das tecnologias existentes basearam-se em diferentes fontes de dados. Primeiramente, foram considerados os resultados do estudo realizado por Dalmo et al. (2019), que utilizou a metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) e também se apoiou nos dados de Gutierrez (2016) referentes aos resíduos sólidos urbanos (RSU). Além disso, foram utilizados dados obtidos em plantas de escala comercial da Associação Brasileira do Biogás (ABiogás) (ABIÓGÁS, 2020). Outro estudo considerado foi o de He et al. (2019), que investigou a influência da temperatura e do catalisador do reator no rendimento e na composição do produto durante o processo de gaseificação de RSU. Del Alamo et al. (2022) também foram referenciados, pois investigaram a influência dos parâmetros do processo de gaseificação na composição e no valor calorífico do

syngas produzido em escala comercial. Por fim, o estudo de viabilidade do Projeto CIVAP, conduzido por Infiesta (2015), também foi utilizado como referência.

Foram estabelecidos os potenciais energéticos para internalização nos cenários propostos, considerando as seguintes tecnologias: Disposição de RSU em Aterro Sanitário, Biodigestão Anaeróbia da Fração Orgânica do RSU, Incineração e Gaseificação:

- No cenário *business as usual*, considerando o total de RSU destinado para aterros sanitários, foram utilizados os valores de material reciclado recuperado estabelecidos no diagnóstico:
 - Disposição de RSU em Aterro Sanitário;
 - Incineração.
- No cenário Brasil, que envolve a combinação de tecnologias de recuperação energética termoquímica e bioquímica, foram utilizados os valores de recuperação de material reciclado, conforme estabelecido na Minuta do Termo de Compromisso para a Implementação de Ações Voltadas à Economia Circular e Logística Reversa de Embalagens em Geral, do Ministério do Meio Ambiente em 2020:
 - Biodigestão Anaeróbia da Fração Orgânica do RSU;
 - Gaseificação.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram estabelecidas duas considerações importantes:

- Na primeira consideração, é importante ressaltar que os valores de recuperação de material reciclado previstos para o cenário Brasil não levam em conta todas as variáveis logísticas, sociais e econômicas que podem influenciar significativamente o alcance das metas estabelecidas. Essas condicionantes devem ser objeto de um estudo específico para uma avaliação mais abrangente e precisa;
- Na segunda consideração, devido à ausência de estudos específicos sobre as variáveis energéticas dos resíduos sólidos urbanos (RSU), foram adotados dados da literatura como base. No entanto, é importante ressaltar que, dado o objetivo deste trabalho, que é compreender as possibilidades de melhores arranjos e redes, a generalização do poder calorífico dos RSU não foi um fator crítico para os resultados obtidos.

- O lixão de Jardim Gramacho e possíveis cenários de aproveitamento energético.

4.1.5. Resultados e discussão do cenário

A proposta de cenários foi embasada na revisão da literatura sobre redes e arranjos. Conforme Fiore (2013), as atividades relacionadas aos resíduos sólidos constituem redes técnicas reais, com características específicas em cada localidade, envolvendo todos os elementos territoriais pelos quais os resíduos sólidos transitam. Por meio da interação das redes urbanas e geográficas descritas por Santos (1996), Pereira e Kahil (2016), Pereira (2019), Corrêa (2021) e os dois modelos propostos por Gambi (2018) e Fiore (2013), foi possível estabelecer o cenário *business as usual* representando a rede técnica real municipal (figura 9).

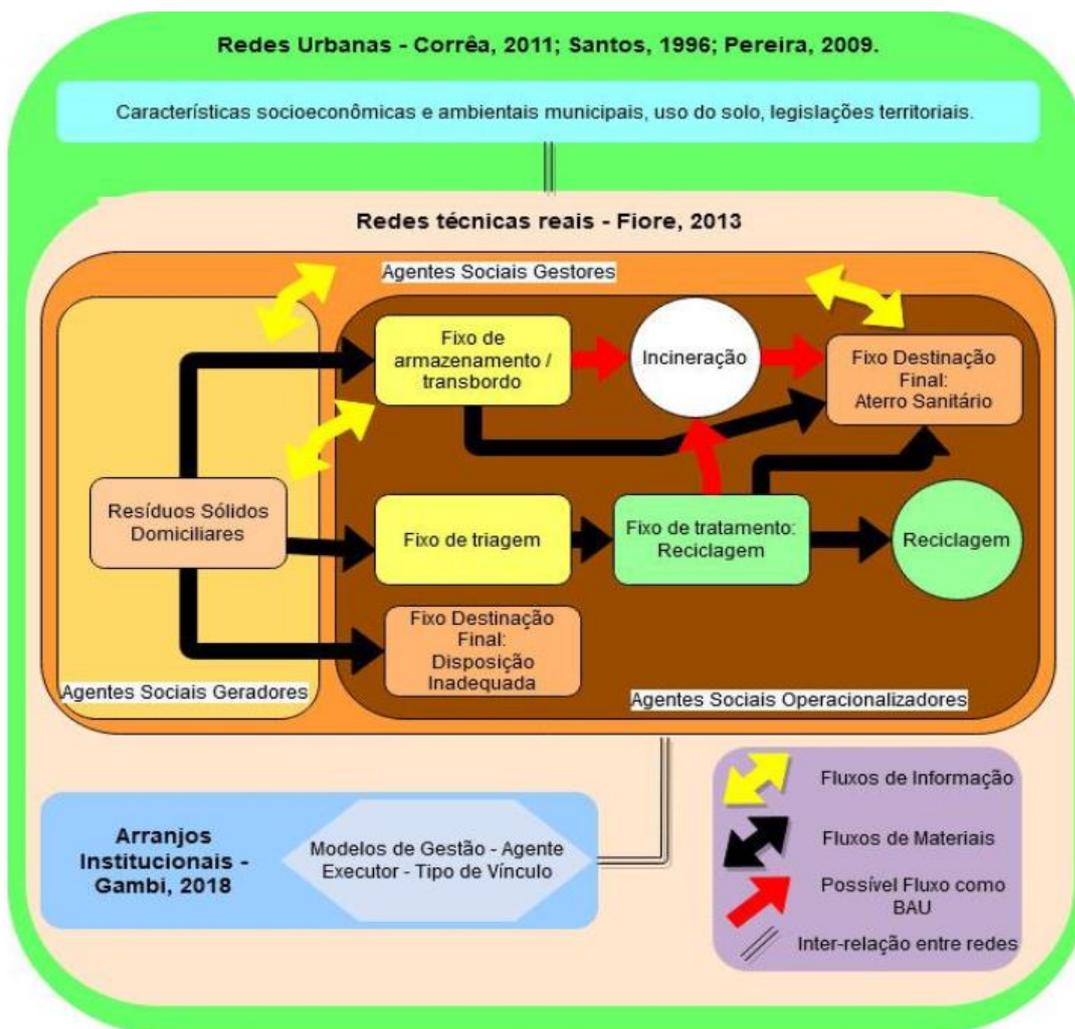


Figura 9 - Rede técnica real municipal - cenário business as usual.
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De acordo com Fiore (2013), as redes técnicas idealizadas de resíduos sólidos são aquelas que buscam minimizar a geração de resíduos ao máximo possível, levando em conta os acordos sociais vigentes no território. Além disso, essas redes priorizam a utilização econômica daqueles resíduos que são viáveis para tal, e reduzem ao mínimo os impactos decorrentes da disposição dos resíduos restantes (Fiore, 2013). Novamente, por meio da inter-relação das redes, agora consideradas metropolitanas e geográficas, estabelecidas por Santos (1996), Pereira e Kahil (2016), Pereira (2019) e Corrêa (2021), juntamente com os dois modelos apresentados, foi possível definir a rede técnica idealizada para a região metropolitana como o cenário metropolitano, conforme ilustrado na Figura 10.

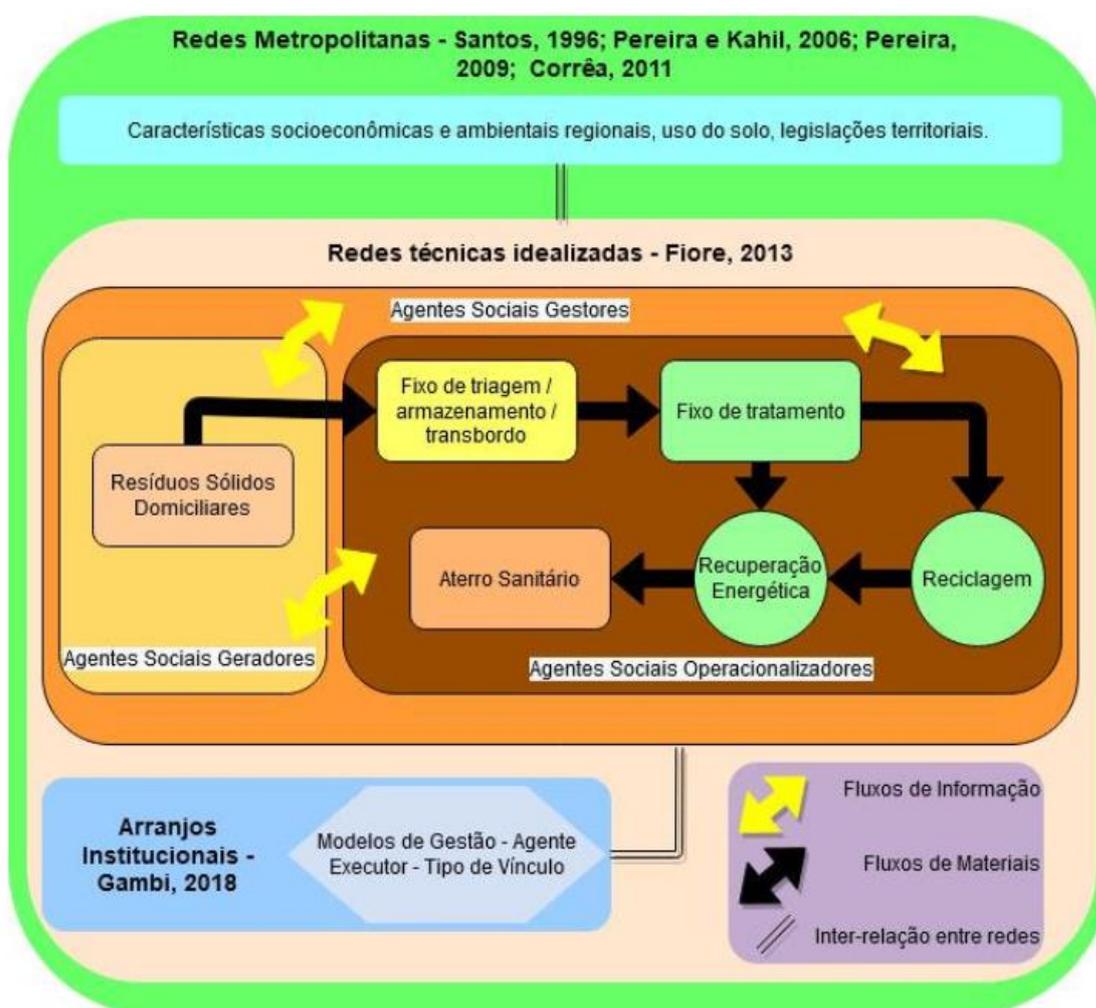


Figura 10 - Rede técnica idealizada regional - Cenário Metropolitano.
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nos dois cenários propostos, é importante ressaltar que o componente de reciclagem, embora não seja o foco deste trabalho, possui o potencial de retornar à

cadeia produtiva como matéria-prima, assim como os produtos resultantes da recuperação energética. A reciclagem desempenha um papel significativo na economia circular, permitindo a reutilização de materiais e evitando o desperdício.

4.1.6.

Dados municipais socioeconômicos e demográficos

A localização do Lixão de Jardim Gramacho em Duque de Caxias, no Estado do Rio de Janeiro, é de extrema relevância ao se considerar os dados socioeconômicos e demográficos. O lixão está inserido na região da Baixada Fluminense, que faz parte da macrometrópole fluminense, uma conexão das principais áreas metropolitanas do estado, incluindo a capital, Rio de Janeiro. Além disso, a região abrange diversas aglomerações urbanas, como a de São João de Meriti, Belford Roxo e Nova Iguaçu, que contribuem significativamente para os indicadores sociais e demográficos locais (ITERJ, 2022).

A área ao entorno do lixão é densamente povoada, com uma grande concentração de habitantes. Isso pode impactar diretamente nas questões socioeconômicas, como o acesso a serviços básicos e a geração de renda para a população local. A ausência de infraestrutura adequada, como evidenciado na figura 11, e a escassez de oportunidades de emprego são desafios que podem prejudicar a qualidade de vida da comunidade adjacente ao lixão. A macrometrópole fluminense apresenta uma grande diversidade social e econômica, com áreas de elevado desenvolvimento econômico e outras de maior vulnerabilidade social. Além disso, a localização estratégica do lixão em relação às principais vias de transporte e às áreas urbanas da região pode influenciar na dinâmica de coleta e disposição dos resíduos sólidos. A quantidade de resíduos gerada e descartada no local pode variar conforme a demanda da população local e dos municípios vizinhos.



Figura 11 - Entorno das ruas do bairro de Jardim Gramacho, sem a infraestrutura adequada.
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Tabela 5 apresenta os valores socioeconômicos básicos do município de Duque de Caxias, os quais serviram como fundamentação essencial para o estudo realizado.

Tabela 5 - Dados socioeconômicos do município de Duque de Caxias

| Indicador | Valor |
|---|------------------------------|
| População (estimativa 2023) | 921.993 habitantes |
| Densidade Demográfica | 3.871,17 hab/km ² |
| Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) | 0,706 (alto desenvolvimento) |
| Taxa de Alfabetização (2010) | 92,5% |
| Renda per capita (2019) | R\$ 1.720,48 |
| Taxa de Desemprego (2023) | 14,2% |
| Percentual da População em Situação de Pobreza (2023) | 32,5% |

Fonte: IBGE (2023).

A área urbana do município de Duque de Caxias apresenta uma densa população, com aproximadamente 921.993 habitantes estimados para o ano de 2023, resultando em uma densidade demográfica de cerca de 3.871,17 habitantes por quilômetro quadrado. Essa alta densidade populacional pode influenciar diretamente nas questões socioeconômicas da região, afetando o acesso a serviços básicos e a geração de renda para a população local (IBGE, 2023).

Outro indicador relevante é o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), que mede o nível de desenvolvimento humano com base em indicadores de educação, renda e expectativa de vida. Em Duque de Caxias, o IDH é de 0,706, considerado como "alto desenvolvimento humano" pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (IBGE, 2023). Embora o IDH seja um indicador importante para avaliar o nível de desenvolvimento da região, é necessário analisar outras variáveis socioeconômicas para obter uma compreensão mais completa dos desafios e oportunidades enfrentados pela comunidade local.

A Tabela 6 mostra o consumo de energia em Duque de Caxias nos últimos 5 anos.

Tabela 6 - Dados de consumo de energia

| Ano | Consumo de Energia (MWh) | Consumo Per Capita (kWh/Hab/Dia) |
|-----------------|--------------------------|----------------------------------|
| 2018 | 1.423.489 | 8,67 |
| 2019 | 1.435.720 | 8,74 |
| 2020 | 1.455.993 | 8,85 |
| 2021 | 1.476.269 | 8,96 |
| 2022 | 1.495.559 | 9,08 |
| 2023 (estimado) | 1.514.869 | 9,20 |

Fonte: ANEEL (2023).

Os dados apresentados na tabela mostram o consumo de energia elétrica no município de Duque de Caxias nos últimos anos, expresso em megawatts-hora (MWh). Além disso, é indicado o consumo per capita diário em quilowatts-hora (kWh) por habitante. Os valores demonstram o crescimento gradual no consumo total de energia ao longo dos anos, assim como um ligeiro aumento no consumo per capita, indicando um possível aumento na demanda energética da população local ao longo do tempo (ANEEL, 2023).

Os dados apresentados nas tabelas sobre os Dados Socioeconômicos do município de Duque de Caxias e o consumo de energia elétrica revelam uma correlação interessante. Observa-se que o consumo de energia tem aumentado ao longo dos anos, acompanhando o crescimento da população e as mudanças socioeconômicas no município. O aumento do consumo per capita de energia elétrica pode ser atribuído ao desenvolvimento econômico e ao aumento da urbanização na região, o que leva a uma maior demanda por energia para abastecer residências, comércios e indústrias.

Além disso, é importante destacar que a densidade populacional e a concentração de habitantes próximos ao Lixão de Jardim Gramacho podem impactar o consumo de energia no município, especialmente nas áreas mais próximas ao local. A falta de infraestrutura adequada e as condições socioeconômicas desfavoráveis podem influenciar a qualidade de vida da população local e, por consequência, a demanda por energia elétrica para atender às necessidades básicas do dia a dia.

4.1.7. Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos

Por meio da coleta de dados nos Planos Municipais de Resíduos Sólidos, Planos dos Consórcios incidentes em Duque de Caxias, no Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos de 2022 do SNIS e das informações obtidas por meio dos questionários de triagem, foi possível realizar a caracterização e quantificação dos Resíduos Sólidos Domésticos (RSD) de Duque de Caxias, conforme apresentado no Tabela 7.

Essa abordagem metodológica permitiu obter uma visão abrangente e precisa da geração e composição dos resíduos sólidos no município, contribuindo significativamente para a análise de viabilidade das tecnologias de aproveitamento energético a serem consideradas. Com base nesses dados consolidados, torna-se possível avaliar a disponibilidade de matéria-prima para a geração de energia e identificar potenciais oportunidades de reaproveitamento e reciclagem dos resíduos sólidos, fundamentais para o desenvolvimento de estratégias eficientes e sustentáveis de gerenciamento desses resíduos em Duque de Caxias.

Tabela 7 - Valores de Geração de Resíduos Sólidos Domésticos em Duque de Caxias

| Ano | Geração de RSD (ton) | Geração Per Capita (kg/hab.dia) | Índice Estimativo INEA | Orgânico | Reciclável | Rejeito | Coleta Seletiva (% dos recicláveis) |
|------|----------------------|---------------------------------|------------------------|----------|------------|---------|-------------------------------------|
| 2022 | 200,000 | 1.1 | 0.6 | 60% | 20% | 20% | 30% |

Fonte: Dados adaptador dos Planos Municipais de Resíduos Sólidos, Planos dos Consórcios incidentes em Duque de Caxias e informações do Índice Estimativo INEA (2022).

Ao examinar a tabela 7, que contém os dados sobre a geração de Resíduos Sólidos Domésticos (RSD) em Duque de Caxias para o ano de 2022, estimou-se

que o município produziu cerca de 200.000 toneladas de resíduos sólidos durante o ano. Isso equivale a uma geração per capita de 1,1 kg por habitante por dia. Esses números são relevantes para a compreensão da magnitude do desafio enfrentado pelas autoridades locais na gestão adequada dos resíduos sólidos, considerando o alto volume produzido e sua influência direta no ambiente e na qualidade de vida da população.

De acordo com o Índice Estimativo INEA de 2022, os resíduos sólidos em Duque de Caxias são classificados em três categorias principais: orgânicos, recicláveis e rejeitos. O índice estima que 60% dos resíduos gerados são de origem orgânica, 20% são recicláveis e os outros 20% são rejeitos, ou seja, materiais que não são passíveis de reaproveitamento ou reciclagem. Essa divisão é fundamental para identificar as potencialidades de reaproveitamento dos resíduos sólidos e orientar ações de coleta seletiva para maximizar a recuperação dos materiais recicláveis.

É possível observar, também, que a taxa de coleta seletiva dos resíduos recicláveis em Duque de Caxias é de aproximadamente 30%. Essa porcentagem representa o percentual de materiais recicláveis que são separados e coletados de forma seletiva, visando o seu posterior reaproveitamento e reciclagem. A coleta seletiva é uma das estratégias fundamentais para o gerenciamento sustentável dos resíduos sólidos, pois contribui para a redução do volume de materiais destinados aos aterros sanitários e para a preservação dos recursos naturais.

Conforme é possível observar na Tabela 7, a geração per capita diferem do Índice Estimativo do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Rio de Janeiro, que é relacionado ao tamanho da população. Além disso, observa-se que a geração de RSD pode estar relacionada a outros indicadores socioeconômicos, como o PIB per capita. Analisando os dados para o município de Duque de Caxias, observa-se que a geração per capita de RSD não segue uma tendência única em relação ao tamanho da população ou ao PIB per capita.

Essa diversidade de resultados sugere que a geração de RSD está relacionada a fatores complexos e multifacetados, além do tamanho da população e do PIB per capita. Outros indicadores, como a composição da atividade econômica local, a infraestrutura de coleta e manejo de resíduos, a conscientização da população em relação à separação de resíduos e a existência de políticas públicas

voltadas para a gestão de resíduos sólidos podem influenciar significativamente os valores de geração per capita de RSD em cada município.

Portanto, é essencial considerar uma abordagem integrada e contextualizada ao analisar a geração de resíduos sólidos e suas relações com outros indicadores socioeconômicos em cada localidade, percebendo assim o que ocorreu no Lixão de Gramacho.

4.1.8. Potencial de Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos

O cálculo do Potencial de Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSD) do Lixão de Gramacho foi realizado com base em estudos anteriores, como o trabalho de Dalmo et al (2022), que utilizou a metodologia do IPCC (2022) para comparar o potencial de recuperação energética dos RSU gerados nos municípios do Estado do Rio de Janeiro. Além disso, foram considerados dados fornecidos pela ABiogás (2022), Del Alamo et al (2022), He et al (2019), e Infiesta (2015), que contribuíram para a análise das tecnologias de aproveitamento energético abordadas neste estudo. Essas informações foram essenciais para estimar o potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos da região, proporcionando uma visão abrangente das possibilidades de recuperação energética e sua viabilidade.

Por meio da análise dos dados de gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSD) conforme apresentados na Tabela 8, foi possível calcular o potencial de recuperação energética por meio de diferentes tecnologias. Especificamente, foram considerados o aproveitamento do biogás gerado pela disposição dos RSD em aterro sanitário e pela biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos RSD, bem como as tecnologias de incineração e gaseificação.

No caso da gaseificação, o cálculo do potencial de recuperação energética levou em conta as metas de recuperação de materiais recicláveis previstas para o ano de 2022 na Minuta do Termo de Compromisso para a Implementação de Ações Voltadas à Economia Circular e Logística Reversa de Embalagens em Geral, conforme demonstrado na Tabela 8 (Ministério do Meio Ambiente, 2023).

Tabela 8 - Metas previstas de recuperação de materiais recicláveis para 2023

| Material | % |
|----------|------|
| Vidro* | 26,5 |
| Plástico | 35 |
| Metal* | 85 |
| Papel* | 60,5 |

*Materiais considerados inertes.

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2023).

Para a realização dos cálculos, foram considerados os dados da Tabela 9. Devido à natureza variável do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos rejeitos, impossibilitando a padronização do seu valor ao longo do tempo e em diferentes localidades, optou-se por utilizar o valor médio do PCI e da umidade dos demais resíduos de forma proporcional. Essa abordagem foi adotada para estimar o potencial energético dos resíduos sólidos, levando em conta as particularidades e variações desses parâmetros ao longo das diferentes amostras coletadas.

Tabela 9 - Potencial calorífico dos resíduos sólidos urbanos

| RSU | PCI (Base úmida) (MJ/kg) | Umidade (%) |
|----------------------------------|--------------------------|-------------|
| Matéria orgânica | 3,16 | 68 |
| Papel e papelão | 9,16 | 32 |
| Têxteis e couro | 12,90 | 32 |
| Plástico | 23,04 | 23 |
| Inerte | 0,00 | 0 |
| Material Reciclável Total | 14,61 | 24 |
| Rejeito | 7,40 | 52 |
| | Total | 52 |

Fonte: Dados adaptador de Dalmo et al. (2022).

As equações adaptadas utilizadas foram:

- Potencial energético do RSD a partir da disposição em aterro sanitário, de acordo com o trabalho de Dalmo et al. (2022) com base na metodologia IPCC (2016):

Para o cálculo de potencial de geração de metano, tem-se:

$$Q_{CH_4} = \frac{RSDt * Lo}{\rho * CH_4} \quad (1)$$

$$Lo = DOC * DOCf * F * \frac{16}{12} \quad (2)$$

$$DOC = \Sigma(DOC_i * W_i) \quad (3)$$

$$DOCf = 0,014 * T * 0,28 \quad (4)$$

Onde:

Q_{CH_4} = metano gerado ($m^3_{CH_4}/ano$);

RSD_t = RSD total gerado no ano de 2017 (t/ano);

L_o = potencial de geração de metano (kg de CH_4/kg do RSD);

ρ_{CH_4} = massa específica do metano ($0,715kg/Nm^3$);

DOC = degradação orgânica do carbono (kg de C/kg de RSD);

DOC_i = degradação orgânica do carbono por tipo de resíduos (kg de C/kg de RSD);

W_i = porcentagem do tipo de resíduos (%);

DOC_f = fração de DOC dissociado (%);

T = temperatura na zona anaeróbia ($35^\circ C$);

F = fração de metano no biogás de aterro (50%);

(16/12) = fator de conversão do carbono em metano (kg de CH_4/kg de C).

Para fazer o cálculo do potencial de geração de energia se tem:

$$P_x = Q_{CH_4} * PCI_{metano} * \frac{E_c}{31.536.000} \quad (5)$$

$$P_{el} = P_x * E_m \quad (6)$$

$$E = P_{el} * 8.000 \quad (7)$$

Onde:

P_x = produção de calor disponível (kW);

PCI_{CH_4} = poder calorífico inferior do metano ($35,530 kJ/Nm^3$ de CH_4);

31.536.000 = total de segundos em um ano;

E_c = eficiência de coleta de biogás (utilizado valor calculado na UTE Guatapar em 2014) (65%);

P_{el} = potência elétrica disponível (kW);

E_m = eficiência do motor de combustão interna (utilizado valor calculado na UTE Guatapar em 2014) (39,6%);

E = eletricidade disponível (kWh/ano);

Foram utilizados 8.000 horas anuais de uso do motor gerador, descontando horas de manuteno.

• Potencial energético por meio de biodigestão anaeróbica da fração orgânica dos RSG, de acordo com Dalmo et al. (2022) com base na metodologia IPCC (2022), e com os dados coletados pelo Abiogás (2022):

A determinação do potencial de geração de metano, de acordo com o estudo conduzido por Dalmo, et al (2019), é realizada utilizando uma abordagem específica:

$$QCH_4 = RSDt * MO * SV * PBM \quad (8)$$

Onde:

MO = fração de matéria orgânica no RSD (%);

SV = teor médio de sólidos voláteis (0,257 gSV/g de matéria orgânica);

PBM = potencial bioquímico de metano da matéria orgânica (277 m³CH₄/tSV).

Para o cálculo do potencial de geração de energia utilizaram-se as mesmas equações do potencial energético do RSD a partir da disposição em aterro sanitário (6, 7 e 8), porém, considerou-se a eficiência de coleta de biogás de 100%.

Para o cálculo do potencial de geração de metano, de acordo com os dados apresentados pela Abiogás (2022), tem-se:

$$QCH_4 = RSDt * MO * MS * f * c \quad (9)$$

Onde:

MO = fração de matéria orgânica no RSD (%);

MS = teor de matéria seca (22%);

f = fator de conversão (359 Nm³ biogás/tMS RSU);

c = concentração de metano (50%CH₄/Nm³ biogás).

Para o cálculo do potencial de geração de energia tem-se:

$$E = QCH_4 * Pe * Ee \quad (10)$$

Onde:

E=eletricidade gerada (kWh/ano); Pe=potencial energético (9,97 kWh/Nm³CH₄);

Ee=eficiência elétrica (38%).

• Potencial energético dos RSD a partir da incineração, segundo o trabalho de Dalmo et al. (2019):

Para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) tem-se:

$$PCIt = \Sigma(f * PCIf) \quad (11)$$

Onde:

PCIt = PCI do RSD (MJ/kg);

F = fração gravimétrica do tipo de RSD (%);

PCIf = PCI por tipo de RSD (MJ/kg).

Para o cálculo do potencial de geração de energia tem-se:

$$E = RSDt * PCIt * Et * 0,28 * 0,913 \quad (12)$$

Onde:

Et = eficiência térmica da planta de incineração de RSD (25%);

0,28 = constante de conversão (MWh/GJ);

0,913 = conversão de 8.760 horas anuais para 8.000 horas trabalhadas.

• Potencial energético dos RSD a partir da gaseificação, segundo os trabalhos de Del Alamo et al. (2022), He et al. (2019), Infiesta (2015):

Para o cálculo do potencial de geração de *syngas*, tem-se:

$$Qsyngas = RCDR * Lo \quad (13)$$

Onde:

Qsyngas = syngas gerado (Nm³/ano);

CDR = combustível derivado de resíduo, podendo ser considerado o rejeito gerado adicionando ou não os materiais recicláveis não recuperados (kg/ano);

Lo = potencial de geração de syngas (0,74 Nm³ de syngas / kg do CDR).

Para o cálculo do potencial de geração de energia tem-se:

$$E = Qsyngas * PCIsyngas * P \quad (14)$$

Onde:

E = eletricidade gerada (kWh/ano);

P = produção de energia por unidade de syngas (0,311 kWh/Nm³ de syngas);

PCIsyngas = poder calorífico inferior do syngas (kcal/Nm³ de syngas).

Obs.: Foi utilizada uma média dos PCI_{syngas} calculada por del Dalmo et al. 2022 (4,34 MJ/Nm³) e Infiesta, 2015 (1.160 kcal/Nm³); Fator de Conversão: 1 kcal=0,004184 MJ; P=estimativa feita através dos dados calculados por del Dalmo et al. 2022 e Infiesta, 2015.

Como resultado, foi elaborado na Tabela 10, que sintetiza os resultados por tecnologia para o Lixão de Jardim Gramacho, em Duque de Caxias. Esses documentos fornecem uma visão abrangente do potencial energético identificado no local e das possibilidades de aproveitamento energético específicas para o lixão.

Tabela 10 - Potencial de recuperação energético dos resíduos sólidos urbanos da região lixão de Gramacho

| Alternativa | GWh/ano | % da demanda de energia |
|---|---------------|-------------------------|
| Disposição de RSD em aterro sanitário | 26 | 0,2 |
| Biodigestão anaeróbia da fração orgânica do RSD (Dalmo et al., 2019), baseado na metodologia IPCC (2022) | 105 | 0,9 |
| Biodigestão anaeróbia da fração orgânica do RSF (ABIOGÁS, 2020). | 62 | 0,5 |
| Incineração | 390 | 3,4 |
| Gaseificação considerando a utilização de rejeito e 62% do material reciclável | 204 | 1,8 |
| Combinação entre Gaseificação (com rejeito e 62% do material reciclável) e biodigestão anaeróbia da fração orgânica do RSD (ABIOGÁS, 2020). | 266 | 2,3 |
| Consumo anual | 11.470 | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Observa-se que a gravimetria exerce influência significativa no potencial energético, indicando que uma melhor qualidade na segregação dos resíduos sólidos na entrada do sistema, especialmente na coleta residencial, pode maximizar a recuperação energética. Isso resulta em uma redução no percentual de rejeitos, que são compostos, em grande parte, por uma mistura de matéria orgânica e material reciclável, o que pode afetar significativamente seu Poder Calorífico Inferior (PCI) em comparação com o material reciclável puro. Esse cenário reforça a importância de investir em práticas de coleta seletiva e manejo adequado dos resíduos sólidos para otimizar o aproveitamento energético no Lixão de Gramacho.

A rota de recuperação energética através da Disposição de RSU em aterro sanitário, dentro do cenário *business as usual*, mostrou-se menos atrativa em

comparação com outras tecnologias. Em seguida, temos a biodigestão anaeróbia com um potencial relativamente baixo, mesmo considerando os parâmetros teóricos de Dalmo et al. (2019). A comparação entre os potenciais energéticos de dois estudos (Dalmo et al. (2019) e ABIOGÁS (2020) revelou uma redução de 41%, atribuída à utilização de dados obtidos de experimentos em escala real. Entretanto, quando combinada com outras tecnologias, a biodigestão anaeróbia apresenta resultados mais promissores. Nesse contexto, a sinergia entre diferentes tecnologias de recuperação energética pode contribuir para um aproveitamento mais eficiente dos resíduos sólidos e potencializar a geração de energia no Lixão de Gramacho.

A tecnologia de incineração, como rota termoquímica, apresentou o maior potencial de aproveitamento energético, com 3,4% do total consumido no Lixão de Gramacho. No entanto, é importante ressaltar que esse potencial é observado no cenário *business as usual*, no qual não há um tratamento adequado dos resíduos sólidos gerados, com a devida separação e recuperação dos materiais recicláveis. Esse cenário pode limitar o aproveitamento total dos resíduos e reduzir o potencial da tecnologia de incineração em comparação a outras opções mais eficientes.

Considerando o cenário metropolitano, que prevê uma gestão mais adequada dos resíduos sólidos, com a devida separação e a internalização das associações e cooperativas de catadores no processo, a combinação das tecnologias termoquímica e bioquímica, envolvendo a gaseificação para os rejeitos e material reciclável não recuperado, além da biodigestão anaeróbia para a fração orgânica dos resíduos, apresenta um potencial de 2,3% de geração de energia em relação ao total consumido no Lixão de Gramacho. Essa quantidade representa 84% do consumo anual dos serviços públicos dos municípios da região, conforme dados de 2022.

Esses resultados são coerentes com a necessidade de buscar sustentabilidade financeira na gestão dos resíduos sólidos, conforme preconiza a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Além disso, as possibilidades apresentadas pelas tecnologias termoquímicas e bioquímicas têm potencial para reduzir os impactos ambientais e socioeconômicos em escala regional, ao diminuir a destinação de resíduos sólidos para aterros sanitários e possibilitar a produção de subprodutos fertilizantes por meio da biodigestão anaeróbia. Essas alternativas se alinham com os princípios da economia circular e da busca por práticas mais sustentáveis na gestão dos resíduos sólidos.

5 Considerações Finais

Neste estudo, foram examinadas as interações entre os diversos fluxos e elementos das redes geográficas que caracterizam as regiões metropolitanas e que impactam as redes técnicas de gestão dos resíduos sólidos urbanos. Com base nessas análises, foram propostos modelos que buscam estar mais alinhados com os princípios e objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). O foco da pesquisa foi compreender como as redes urbanas e territoriais podem influenciar a eficiência e a sustentabilidade das estratégias de manejo de resíduos sólidos, visando promover práticas mais adequadas e sustentáveis para o tratamento e a destinação dessas matérias.

A análise das tecnologias de recuperação energética existentes, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, revelou que as rotas termoquímicas demonstram um considerável potencial de recuperação energética. A incineração, ao considerar o total dos resíduos sólidos urbanos gerados, apresenta um potencial de 390 GWh/ano, enquanto a gaseificação, ao levar em conta o uso de rejeitos e 62% do material reciclável, possui um potencial de 204 GWh/ano. No entanto, é importante destacar que a incineração requer uma grande quantidade diária de resíduos e depende de materiais com alto Poder Calorífico Inferior (PCI), como os materiais recicláveis, o que a torna oposta à via da recuperação de materiais recicláveis. Além disso, a incineração demanda altos investimentos e é considerada uma atividade de alto impacto ambiental. Em contraste, a gaseificação oferece a possibilidade de geração de energia associada à recuperação de materiais recicláveis e pode ser implementada em pequenas plantas, o que representa uma vantagem significativa.

As rotas bioquímicas, por sua vez, revelaram um potencial de recuperação energética menor. A recuperação de gás de aterro sanitário apresentou um potencial de 26 GWh/ano, enquanto a biodigestão anaeróbia alcançou 62 GWh/ano. É importante ressaltar que a utilização de aterros sanitários é considerada o modelo menos sustentável de gestão dos resíduos sólidos, uma vez que não há tratamento

ou recuperação de materiais recicláveis em seu processo e requer a construção de grandes plantas com significativos impactos socioambientais.

Em contrapartida, a biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos demonstrou potenciais mais sustentáveis. Ao recuperar energia apenas da fração orgânica, esse processo gera subprodutos como fertilizantes, o que o torna mais favorável ao meio ambiente e à economia, uma vez que não concorre com a recuperação de materiais recicláveis. Essa abordagem se alinha melhor aos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que busca incentivar a recuperação energética sem comprometer a reciclagem e o aproveitamento de materiais recicláveis.

Portanto, a combinação de tecnologias termoquímicas e bioquímicas, como a gaseificação e a biodigestão anaeróbia, pode ser uma estratégia eficaz para a região do Lixão de Jardim Gramacho, em Duque de Caxias, proporcionando uma gestão mais sustentável dos resíduos sólidos urbanos. Ao maximizar a recuperação energética e promover a reciclagem de materiais, essas tecnologias podem contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais e socioeconômicos na região, além de favorecer a economia local e melhorar a qualidade de vida da comunidade circundante ao lixão.

Dessa forma, é fundamental que as autoridades e gestores públicos considerem a implementação de tecnologias mais eficientes e alinhadas com os princípios da sustentabilidade, visando o desenvolvimento de um sistema integrado de gestão de resíduos sólidos em Duque de Caxias.

Para pesquisas futuras sugere-se a realização de um estudo detalhado para instalações de placas fotovoltaicas no Polo de Reciclagem de Jardim Gramacho, considerando o levantamento de dados sobre o consumo energético diários e anuais, a fim de dimensionar adequadamente o sistema, além de realizar uma análise de viabilidade econômica para determinar o retorno sobre o investimento (ROI) e o período de *payback* do sistema fotovoltaico.

Referências Bibliográficas

ABIOGÁS. **Entidades lançam Frente Brasil de Recuperação Energética de Resíduos – A Bio gás**. 2020. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/entidades-lancam-frente-brasil-derecuperacao-energetica-de-residuos/>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, 2022.

ALBERTE, E. P. V.; CARNEIRO, A. P.; KAN, L. **Recuperação de áreas degradadas por disposição de resíduos sólidos urbanos**. Feira de Santana: Diálogos & Ciência, 2015.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Dados de consumo de energia elétrica no município de Duque de Caxias. 2023**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 20 de jul. 2023.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 - Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BAIRD, C.; CAIN, M. **Química Ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2021.

BASTOS, V. P.; BOTAO, M. R. Os desafios enfrentados pelos catadores de materiais recicláveis diante da precarização do trabalho: o caso do lixão de Gramacho no Brasil. **Revista Lider**, Osorno, v. 21, p. 63-84, 2019.

BASTOS, V. P.; FIGUEIREDO, F. F. Os desafios de efetivar a Política de Resíduos Sólidos brasileira: o caso do lixão de Jardim Gramacho. **Revista de Estudos Brasileiros**, v. 5, p. 53-69, 2018.

BASTOS, V. P.; FIGUEIREDO, F. F.; GRACY, C. Uma década da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o que mudou? **Ciências da Sociedade**, v. 4, p. 30, 2020.

BASTOS, V. P.; MAGALHÃES, A. O. Lixão de Gramacho: impactos do encerramento para os catadores. **Temporalis**, v. 1, p. 379-398, 2016.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceito básico de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC / USP, 2019.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política nacional de resíduos sólidos** [recurso eletrônico]. 2. ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012.

CAMPOS, C. T.; DE MOURA, M. C. P.; DE SOUZA, D. T.; DE LIMA, M. M. The end of landfill disposal: Opportunities for landfill gas and leachate management in Brazil. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 37, n. 1, p. 203-212, 2018.

CANDIANI, G.; MOREIRA, J. M. L. Avaliação dos parâmetros cinéticos da geração de metano em uma célula experimental de resíduos sólidos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 3, p. 459-470, 2018.

CARVALHO, A. T. C. et al. Análise ambiental de um lixão desativado: estudo de caso Jardim Gramacho. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 3, p. 78-90, 2012.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. Estado da Arte da Gaseificação - Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região norte. In: **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos**. São Paulo: INEA, 2016. Disponível em: <file:///C:/Users/AnaBeatriz/Downloads/inventario-residuos-solidos-2016. INEA.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2023.

CHEREMISINOFF, N. P.; ROSENFELD, P. E. Sources of air emissions from pulp and paper mills. In: **Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production**. Elsevier, p. 179-259, 2020.

COMITÊ DE VALORAÇÃO ENERGÉTICA. **Recuperação Energética - Resíduos Sólidos Urbanos ABRELPE e PLASTIVIDA**. 2022. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/_download/informativo_recuperacao_energetica.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2023.

CORRÊA, R. L. Redes geográficas: reflexões sobre um tema persistente. **Cidades**, v. 9, n. 16, p. 199-218, 2021.

COSTA, D. F. **Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização**. (Monografia) Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

D'ALMEIDA, M. L. O. (Org.) **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. Brasília: CEMPRE, 2022.

DA PAZ, D. H. F. et al. **Inventory of methane emissions from municipal solid waste management in Pernambuco state, Brazil**. 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84937922589&origin=resultslist&sort=plff&src=s&st1=organic+OR+household+OR+municipal+AND+*waste+OR+residue+AND+energy+OR+biogas+AND+recovery&nlo=&nlr=&nls=&sid=516b4bba91be893f2f42171ef355f60e&sot=b&sd>. Acesso em: 2 jun. 2023.

DALMO, F. C. et al. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 461-474, 2019a.

DALMO, F. C. et al. Energy recovery from municipal solid waste of intermunicipal public consortia identified in São Paulo State. **Waste Management & Research**, v. 37, n. 3, p. 301-310, 2019b.

DE GOMES, M. B. M. et al. **Life Cycle Assessment Electricity Generation from Landfill in São Paulo City**. In: IFIP INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEMS (APMS), Sep 2015, Tokyo, Japan. 2015. p. 632-639.

DE SOUZA, S. N. et al. Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment. **Waste Management & Research**, v. 32, n. 10, p. 1015-1023, 16 out. 2014.

DEL ALAMO, G. et al. Characterization of syngas produced from MSW gasification at commercial-scale ENERGOS Plants. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1835-1842, 2022.

DEWAYNE, L. S. et al. A framework for conducting and evaluating research. **Journal of Accounting Literature**, v. 22, p. 130-167, 2013.

DIAS, S. M. F; VAZ, L. M. S. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos: uma etapa preliminar no gerenciamento do lixo**. In: XXIII CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Cancun, 2002. p. 1-5.

DONHA, M. S. **Conhecimento e participação da comunidade no sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: o caso de Marechal Cândido Rondon/PR**. Florianópolis, 2002. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

DUQUE DE CAXIAS (Município). **Decreto nº 7517, de 2 de março de 2020**. Institui o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Duque de Caxias (PMGIRS). Duque de Caxias, RJ, 2020. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/d/duque-decaxias/decreto/2020/752/7517/decreto-n-7517-2020-institui-o-plano-municipal-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos-do-municipio-de-duque-de-caxias-pmgirs>>. Acesso em: 22 abr. 2024

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas**. Campinas, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2013.

FALCÃO, R. B. M.; ARAUJO, T. E. P. **A educação ambiental no enfrentamento da problemática do lixo de uma comunidade da zona rural do semiárido nordestino**, 2015. Disponível em: <<http://proasne.net/ProblematicalixoMirandas.htm>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

FELIPETTO, A. V. M. **Conceito, planejamento e oportunidades**. Coordenação de Karin Segala. Rio de Janeiro: IBAM, 2017. (Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos).

FERNANDES, J. U. J. **Lixo, Limpeza pública urbana**; gestão de resíduos sólidos sob o enfoque do direito administrativo. Belo Horizonte: Del Rey, 2021.

FERREIRA, C. F. A.; JUCÁ, J. F. T. Metodologia para avaliação dos consórcios de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais (Methodology for assessment of consortia of municipal solid waste in Minas Gerais). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 159–31015, 2017.

FERREIRA, L.; JIMÉNEZ, P. C.; HUISINGH, D. Sustainable solid waste management: Trends, barriers, and opportunities. **Waste Management**, v. 87, p. 44-57, 2019.

IORE, F. A. **A gestão municipal de resíduos sólidos por meio de redes técnicas**. Campinas, SP: Unicamp, 2013.

FOGLIATTI, M. C.; FILIPPO, S; GOUDARD, B. **Avaliação de impactos ambientais**: aplicação aos sistemas de transporte. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

FRANKENBERG, C. L. C. Resíduos sólidos: geração, gestão e responsabilidades. **Revista Textual**, n. 13, 2021.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Orientações técnicas para atendimento da Deliberação Normativa 118/2008 do Conselho Estadual de Política Ambiental/Fundação Estadual do Meio Ambiente**. Belo Horizonte: Fundação Israel Pinheiro, 2018.

GAMBI, R. F. R. **A Gestão dos Resíduos Sólidos no Brasil**: uma análise crítica das Parcerias Público-Privadas como arranjo emergente. São Paulo: UNICAMP, 2018.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. 2018.

GIL, J. et al. An optimization approach for the placement of photovoltaic panels on landfill sites. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 225-235, 2019.

GOULART COELHO, L. M.; LANGE, L. C. Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 438-450, jan. 2018.

GRYNWALD, S. **Barreiras e facilitadores para o planejamento e implantação de usinas de recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos**. Universidade de São Paulo, 2014.

GUERRA, S. et al. Impactos Ambientais Provocados por um Lixão a Céu Aberto. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 1, n. 2, p. 113-125, 2011.

GUPTA, N.; YADAV, K. K.; KHARE, A. Sustainable management of landfill leachate: Opportunities and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 217, p. 858-870, 2018.

HE, M. et al. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 1, p. 195-203, 2019.

HOSSAIN, M. et al. Biomethane generation potential and utilization for renewable energy in municipal solid waste: A case study of Dhaka city. **Journal of Cleaner Production**, v. 309, p. 1675-1685, 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 2023**. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. **Índice Estimativo INEA 2022: Classificação dos Resíduos Sólidos em Duque de Caxias**. 2022. Disponível em: <<https://www.inea.rj.gov.br/>>. Acesso em: 15 jul. 2022.

INFIESTA, L. R. **Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos (Rsu) no Vale do Paranapanema – Projeto Civap**. 2015 Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/364529223/Gaseificacao-de-Residuos-Solidos-Urbanos-RsuNo-Vale-Do-Paranapanema-Projeto-Civap-Rev04>>. Acesso em: 3 jun. 2023.

ITERJ - INSTITUTO DE TERRAS E CARTOGRAFIA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Dados socioeconômicos e demográficos da região da Baixada Fluminense**. 2022. Disponível em: <<http://www.iterj.rj.gov.br/>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71. São Paulo, jan./abr., 2021.

KUCZMAN, O. et al. Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 382-389, set. 2018.

KUMAR, S. et al. Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 255-273, 2017.

LANZA, V. V. **Cadernos técnicos de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos**. Belo Horizonte, 2020.

LEME, M. M. V. A et al. **Environmental assessment of energy recovery technologies for the treatment and disposal of municipal solid waste using life cycle assessment (LCA): A case study of Brazil**. Proceedings of ecos 2012 - the 25th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, 2022.

LIMA, M. Q. **Lixo: Tratamento e biorremediação**. 3. ed. São Paulo: Hemus Editora Ltda, 2014.

LIMA, N. S. **Estudo do Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos**. Universidade de Lisboa, 2014.

LOPES, E. J. et al. Evaluation of energy gain from the segregation of organic materials from municipal solid waste in gasification processes. **Renewable Energy**, v. 116, p. 623-629, 2018.

MAGGIORE, R. et al. Techno-economic analysis of a landfill gas to biomethane upgrading plant: The case study of a former municipal landfill in southern Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121179, 2020.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia do Trabalho Científico**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MASSAI, L. R.; MASSAI, L. R. D. **Oxidação térmica do líquido percolado (chorume) de aterros sanitários**. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA - COBENGE 2015, 2015, Campina Grande – PB, 2015.

MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 863–875, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Portaria Interministerial no 274, de 30 de abril de 2019**, 2019. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/web/dou/-/portariainterministerial-no-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>>. Acesso em: 7 jun. 2023.

MIRANDA, L. H. T. G. **Aproveitamento Energético De Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo De Caso No Município De Itanhaém-Sp**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2014.

MONTEIRO, J. H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MUNIZ, R. N. **Desafios e Oportunidades para o Acesso Universal à Energia Elétrica na Amazônia**. Belém, 2015. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, 2015.

NÁTHIA-NEVESORCID, G. et al. Start-up phase of a two-stage anaerobic co-digestion process: hydrogen and methane production from food waste and vinasse from ethanol industry. **Biofuel Research Journal**, v. 5, n. 2, p. 813–820, 2018.

OLIVEIRA, J. S.; JUCÁ, J. F. Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 211-217, 2014.

PEREIRA, M. F. V. Redes, Sistemas de Transportes e as Novas Dinâmicas do Território no Período Atual: Notas sobre o Caso Brasileiro. **Sociedade & Natureza**, v. 21, p. 121-129, 2019.

PEREIRA, M. F. V.; KAHIL, S. P. O território e as redes: considerações a partir das estratégias de grandes empresas. **Geografia: ações e reflexões**, p. 213-226, 2016.

PEREIRA, T. A. D.; ROSADO, L. P.; PIMENTEL, J. R. Assessment of methane potential from municipal solid waste in Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 113-121, 2021.

PHILIPPI JR, A.; AGUIAR, A. O. Resíduos sólidos: características e gerenciamento. In: PHILIPPI JR, A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Manole, 2015.

POLZER, V. O desafio das cidades: aterro sanitário x incinerador com geração de energia (WTE). **GEO Temas**, v. 3, p. 3–19, 2013.

POSSAMAI, F. P. et al. Lixões inativos na região carbonífera de Santa Catarina: análise dos riscos à saúde pública e ao meio ambiente. **Ciênc. saúde coletiva**, v. 8, n. 5, p. 54-57, 2017.

PRADEEP, J.; HWIDONG, K.; TOWNSEND, T. G. Heavy metal content in soil reclaimed from a municipal solid waste landfill. **Waste Managemnt**, v. 25, p. 25-35, 2015.

PWC - PRICEWATERHOUSECOOPERS. **Guia de Orientação para Adequação dos Municípios à Política Nacional de Resíduos Sólidos**, 2018.

RODRIGUES, F. L. R.; GRAVINATTO, V. M. **Lixo: de onde vem? Para onde vai**. São Paulo: Moderna, 2017.

ROUQUAYROL, M. Z; ALMEIDA FILHO, N. **Epidemiologia e Saúde Pública**. 5. ed., Rio de Janeiro: Medsi, 2019.

SANTOS, M. **A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo. Razão e Emoção**. Editora da ed. São Paulo: Editora da USP, 2016.

SANTOS, R. C. et al. Waste-to-energy: An opportunity for sustainable municipal solid waste management in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 250, p. 109-434, 2019.

SANTOS, R. E. DOS et al. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 198–206, fev. 2019.

SECRETARIA DE ESTADO DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DE SÃO PAULO. **Dados Energéticos**. 2009. Disponível em: <<http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalecv2/index.html>>. Acesso em: 6 jun. 2023.

SECRETARIA DE ESTADO DOS RECURSOS HÍDRICOS, DO MEIO AMBIENTE E DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado da Paraíba: relatório síntese**. Paraíba: SERHMACT-PB, 2018.

SILVA, C. A. et al. **Organic fraction centesimal composition characterization of municipal solid waste from municipal landfill of Santo André aiming the energy application by anaerobic digestion**. 2018 Disponível em: <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-5043790853&origin=resultslist&sort=plff&src=s&st1=quality+OR+quantity+OR+characterisation+AND+municipal+OR+urban+OR+household+AND+solid+AND+waste+OR+residue&nlo=&nlr=&nls=&sid>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

SILVA, F. M. S. et al. Hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion system by co-digestion of food waste, sewage sludge and glycerol. **Waste Management**, v. 76, p. 339349, 2018.

SILVA, P. S.; SOUZA, M.; ALMEIDA, J. Aterro Sanitário e seus Aspectos Ambientais: Estudo de caso Jardim Gramacho – RJ. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 4, p. 64-71, 2013.

SILVA, R. S.; GUIMARÃES, J. R.; BOTERO, W. G.; CAVALCANTE, R. L.; ANDRADE, R. S. Solid waste management in developing countries: An opportunity to reduce environmental impacts and improve human health. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 16, n. 2, p. 317-325, 2017.

SILVA, T. F. et al. Benefits of landfill gas use: Environmental, economic, and social perspective. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 813-820, 2019.

SILVA-MARTÍNEZ, R. D. et al. The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities. **Renewable Energy**, v. 156, p. 509-525, 1 ago. 2020.

SISSINO, C. L. S.; OLIVEIRA, R. M. **Resíduos sólidos, ambiente e saúde: uma visão multidisciplinar**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2020.

STRETTA, M. et al. Energy recovery from municipal solid waste incineration: An environmental assessment integrating life cycle thinking and uncertainty analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120009, 2020.

TEIXEIRA, I. **Vamos Cuidar do Brasil: 4ª CONFERÊNCIA NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – RESÍDUOS SÓLIDOS**. Texto Orientador. 2. ed. Brasília, maio de 2018.

VIANNA, F. C. **Discussão epistemológica da produção científica brasileira em biodiesel**. São Paulo: USP, 2022.

WEI, R. et al. Performance evaluation of cement clinker production from municipal solid waste incineration bottom ash as alternative raw material. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 128-231, 2021.

XIAOLI, C. et al. Characteristics and mobility of heavy metals in an MSW landfill: implications in risk assessment and reclamation. **Journal Hazard Materials**, v. 144, n. 1-2, p. 485-491, 2017.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2. ed. Porto Alegre, 2001.

ZANTA, V. M., FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JÚNIOR, A. B. (Coord.). **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 2013.