
Faculdade de Tecnologia Nilo De Stéfani
Trabalho de Graduação

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA “PAULA SOUZA”

FACULDADE NILO DE STÉFANI DE JABOTICABAL - SP (Fatec-JB)

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS

BIOGÁS GERADO EM ATERROS SANITÁRIOS COMO FONTE DE ENERGIA

MARIA GERALDA FERREIRA DOS SANTOS

PROFA. ORIENTADORA: DRA. ROSE MARIA DUDA

COORIENTADOR: GABRIEL RICHARD DA SILVA DEL VECCHIO

JABOTICABAL, S.P.

2023

MARIA GERALDA FERREIRA DOS SANTOS

BIOGÁS GERADO EM ATERROS SANITÁRIOS COMO FONTE DE ENERGIA

Trabalho de graduação (TG) apresentado à Faculdade de Tecnologia Nilo De Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnóloga em Biocombustíveis.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda

Coorientador: Gabriel Richard da Silva Del Vecchio

JABOTICABAL, S.P.

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Santos, Maria Geralda Ferreira dos

Biogás gerado em aterros sanitários como fonte de energia/Maria Geralda Ferreira dos Santos. — Jaboticabal: Fatec Nilo de Stéfani, 2023.

Orientadora: Rose Maria Duda

Coorientador: Gabriel Richard da Silva Del Vecchio

Trabalho (graduação) – Apresentado ao Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani - Jaboticabal, 2023.

1. Resíduo. 2. Digestão anaeróbia. 3 Bioenergia. I. Duda, R. M. II. Del Vecchio, G. R. da S. Biogás gerado em aterros sanitários como fonte de energia.

MARIA GERALDA FERREIRA DOS SANTOS

BIOGÁS GERADO EM ATERROS SANITÁRIOS COMO FONTE DE ENERGIA

Trabalho de Graduação (TG) apresentado à Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnóloga em Biocombustíveis.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda

Coorientador: Gabriel Richard da Silva Del Vecchio

Data da apresentação e aprovação: 24/11/2023

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA

Presidente e co-orientador: Gabriel Richard da Silva Del Vecchio

Unesp de Jaboticabal, Jaboticabal – SP- Brasil

Prof. Dr. Valciney Gomes de Barros

Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)

Jaboticabal – SP- Brasil

Mestranda Maíza de Lima Bueno

Unesp de Jaboticabal, Jaboticabal – SP- Brasil

Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB) Jaboticabal – SP – Brasil

Biogás gerado em aterros sanitários como fonte de energia
Biogas generated in landfills as an energy source

Maria Geralda Ferreira dos Santos
Rose Maria Duda
Gabriel Richard da Silva Del Vecchio

RESUMO

O crescimento populacional e o avanço industrial desencadearam transformações de grande magnitude no cenário urbano, resultando em desafios de ordem ambiental, social e econômica. Os resíduos sólidos urbanos despejados em aterros sanitários têm tomado espaço a cada ano que passa. A disposição inadequada desses resíduos propicia a formação de lixiviados prejudiciais, contribuindo para a poluição do solo e das águas subterrâneas. Além disso, as emissões de gases de efeito estufa, em especial o metano, representam uma ameaça significativa ao meio ambiente. Contudo, o biogás gerado nos aterros podem ser uma alternativa para geração de energia elétrica. Nesse contexto, este estudo teve por objetivo realizar uma busca bibliográfica sobre o biogás gerado em aterros sanitários, explorando a viabilidade econômica e ambiental de sua utilização como fonte de energia. A coleta, tratamento e aproveitamento do biogás para a geração de eletricidade são considerados alternativas para a redução das emissões de metano e a diversificação da matriz energética.

Palavras-chave: Resíduo sólido. Digestão anaeróbia. Bioenergia.

ABSTRACT

Population growth and industrial advancement have triggered significant transformations in the urban landscape, resulting in environmental, social, and economic challenges. Urban solid waste dumped in landfills has been occupying more space with each passing year. Improper disposal of these wastes contributes to the formation of harmful leachates, leading to soil and groundwater pollution. Additionally, greenhouse gas emissions, particularly methane, pose a significant threat to the environment. However, the biogas generated in landfills can be an alternative to electricity generation. In this context, the research aims to estimate the amount of biogas produced in landfills, exploring the economic and environmental feasibility of its use as an energy source. The collection, treatment, and utilization of biogas for electricity generation are considered alternatives to reduce methane emissions and diversify the energy matrix.

Keywords: Anaerobic digestion. Bioenergy. Solid waste.

1 INTRODUÇÃO

O aumento demográfico conjugado com a Revolução Industrial desencadeou uma série de metamorfoses e inquietações no tecido urbano. A fim de satisfazer as necessidades de uma população em expansão acelerada, houve uma extração e processamento intensivos de recursos naturais, culminando no aumento da oferta de bens e no conseqüente crescimento do consumo. Este fenômeno, por sua vez, teve repercussões significativas nos custos energéticos. O cerne do problema reside predominantemente na inadequada gestão dos resíduos gerados pós-consumo, podendo acarretar diversas manifestações de poluição ambiental. (CALVIS e SILVA, 2018).

A geração e o manejo inadequado de resíduos sólidos urbanos constituem questão crítica em escala global, com repercussões nos domínios ambiental, social e econômico (MATHESON, 2019). Aproximadamente 70% do total de resíduos produzidos em todo o mundo é depositado em aterros, totalizando cerca de 1484 milhões de toneladas anualmente (NANDA e BERRUTI, 2021).

O método de descarte em aterros gera lixiviados perigosos que têm potencial de contaminar o solo e as águas subterrâneas. Os lixiviados consistem em líquidos provenientes da infiltração de água da chuva nos aterros sanitários, contendo uma complexa mistura de compostos orgânicos e inorgânicos solúveis, com elevadas concentrações de contaminantes, como metais pesados, nitrogênio amoniacal e substâncias tóxicas (CLARKE et al., 2015).

Outra consequência prejudicial é a emissão de gases de efeito estufa, como o metano (CH_4), um dos principais contribuintes para o aquecimento global. Essas emissões ocorrem devido à degradação natural da matéria orgânica, resultando na produção de biogás por microrganismos em condições anaeróbias. Por outro lado, o biogás pode ser aproveitado para geração de energia. Nos últimos anos, a digestão anaeróbia de resíduos agrícolas e industriais, resíduos orgânicos urbanos e lodo de esgoto, entre outros, tem se destacado como uma das opções mais atrativas de energia renovável (SCARLAT et al., 2018).

Assim, uma alternativa viável para reduzir a emissão de metano é a coleta, tratamento e utilização desses gases para a geração de eletricidade além de contribuir para a diversificação da matriz energética (ABEDI et al., 2023). Dentro desse contexto, o presente estudo tem como objetivo averiguar o potencial de aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários em termos de geração de energia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são resultados de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, classificados em categorias (Tabela 1). Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (FUNASA, 2006).

Tabela 1 - Categorias de classificação de resíduos sólidos

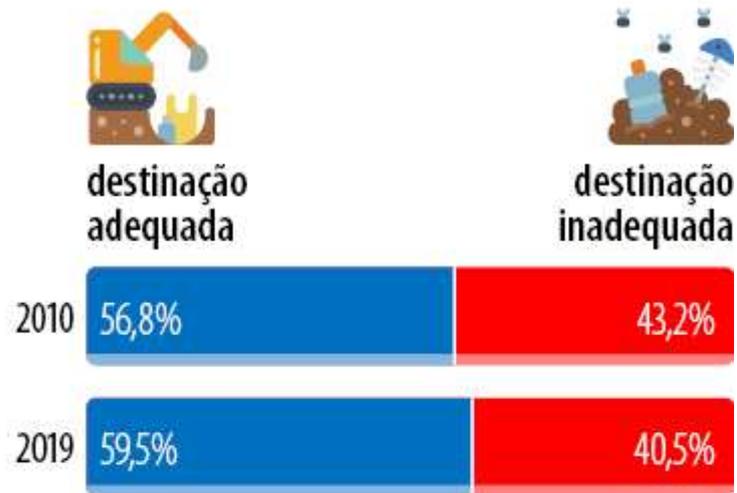
Resíduos urbanos	Provenientes de serviços urbanos, como limpeza e varrição, de residências e estabelecimentos comerciais. Essas receitas podem ser terceirizadas de acordo com as leis municipais.
Resíduos industriais	Provenientes de diversas atividades industriais, incluindo pesquisa, transformação de matérias-primas em novos produtos, mineração, montagem, manipulação de produtos acabados e operações diversas. Além disso, mencionam receitas geradas em áreas de utilidade, apoio, depósito e administração, incluindo resíduos de estações de tratamento de água e esgoto.
Resíduos de serviço de saúde	Provenientes de unidades médico-assistenciais humanas ou animais, centros de pesquisa em farmacologia e saúde, além de receitas relacionadas a medicamentos e imunoterápicos vencidos, deteriorados, provenientes de necrotérios, funerárias, serviços de medicina legal e barreiras sanitárias.
Resíduos de atividades rurais	Provenientes da atividade agropecuária, inclusive os resíduos dos insumos utilizados.
Resíduos de serviços de transportes	Provenientes de embarcação, aeronave ou meios de transporte terrestre, incluindo os produzidos nas atividades de operação e manutenção, os associados às cargas e aqueles gerados nas instalações físicas ou áreas desses locais.
Resíduos da construção civil	Provenientes de atividades como construções, reformas e demolições na construção civil, abrangendo uma variedade de materiais, como tijolos, concreto, metais, madeiras, tintas, entre outros. Esses resíduos, conhecidos como entulhos de obras, calça ou metralha, são fontes de receitas associadas a essas atividades.

Fonte: Adaptado RESÍDUOS SÓLIDOS (2014)

Portanto, esses resíduos são uma mistura de lixo descartado pelos moradores diariamente, que representa uma grave ameaça se não for efetivamente tratado ou reciclado. (LIU et al., 2023). O despejo inadequado tem emergido como uma preocupação significativa no contexto da gestão de resíduos sólidos urbanos, representando um desafio considerável para as autoridades municipais (MONDAL e BHASKAR, 2023), mas vem melhorando a cada ano (Figura 2).

Figura 2 – Despejo de resíduos sólidos orgânicos

Disposição final de RSU no Brasil



Fonte: AGÊNCIA SENADO (2021)

Segundo a ABRELPE (2019), a cobertura da coleta de resíduos sólidos urbanos passou de 88% em 2010 para 92% em 2019, e a quantidade de municípios que contam com o serviço de coleta seletiva passou de 56,6% para 73,1% na comparação entre os dois anos (Figura 3).

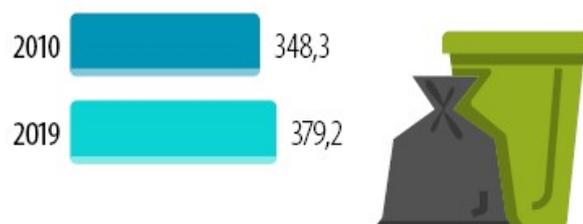
Figura 3 – Geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Geração de RSU no Brasil

geração total (t/ano)



geração per capita (kg/hab/ano)



Fonte: AGÊNCIA SENADO (2021)

É crucial gerenciar os resíduos sólidos urbanos de forma ambientalmente sustentável para evitar efeitos negativos na sociedade humana, problemas ecológicos e desperdício de recursos valiosos (MONDAL e BHASKAR, 2023).

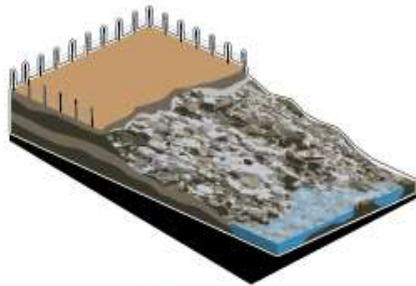
Segundo PIMENTA (2021), existem três métodos principais de disposição final de resíduos, são eles os aterros sanitários, os aterros controlados e os lixões (Figura 4).

Figura 4 - Tipos de aterros



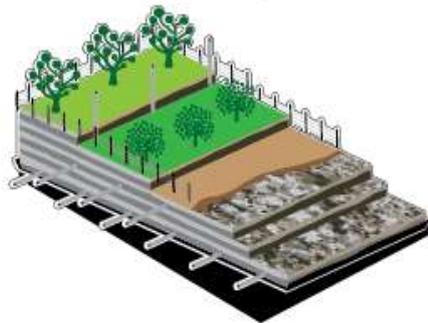
Lixão

Os lixões são terrenos que recebem resíduos a céu aberto, sem tratamento adequado para o lixo. Isso quer dizer que nos lixões, resíduos vindos residências, comércio, indústria e até hospitais são jogados livremente. Além disso, são locais sem controle de entrada e saída de pessoas, ou seja, qualquer um pode acessar o terreno quando desejar.



Aterro controlado

É um intermediário entre o lixão e o aterro sanitário. Geralmente são cercados e a entrada de pessoas é restrita a trabalhadores autorizados. São locais onde os resíduos são despejados e recebem uma cobertura de terra. Em geral, não têm impermeabilização do solo nem tratamento do chorume gerado, tampouco licenciamento ambiental.



Aterro sanitário

Os aterros sanitários seguem regras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Neles, os terrenos são preparados e impermeabilizados com mantas para que os lençóis freáticos não sejam contaminados. Têm chaminés para escape dos gases, sistema de drenagem de chorume e nivelamento de terra. A cobertura do lixo é feito com terra e há licenciamento ambiental.

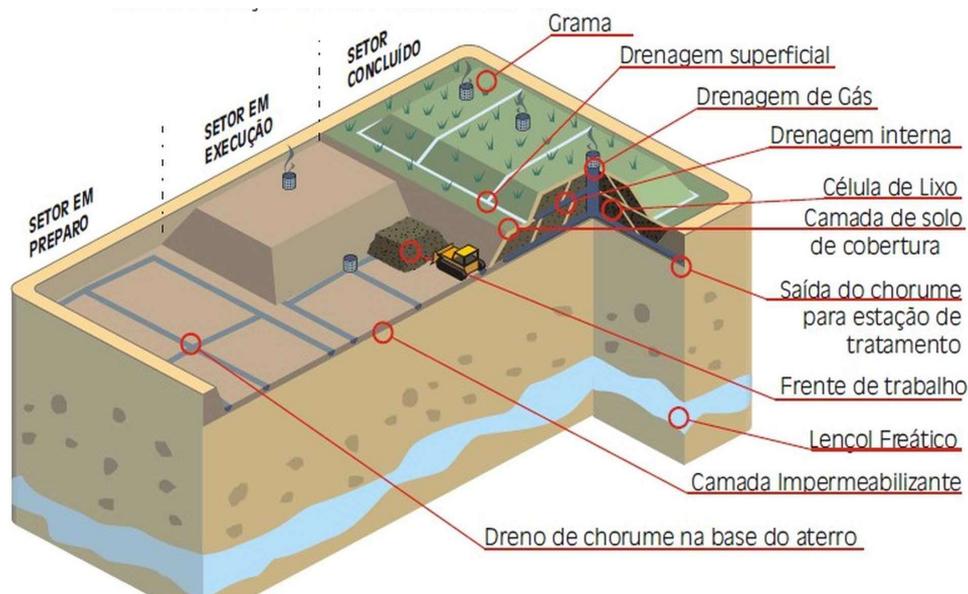
Fonte: TORRE et al. (2017)

2.2 Aterro Sanitário

O aterro sanitário é um processo utilizado para disposição final de rejeitos e resíduos sólidos no solo, particularmente lixo domiciliar. É uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos, seguindo a legislação ambiental específica que tem como objetivo evitar danos à saúde pública, solo, água e ao ambiente em geral (ALVES, 2019; SELURB, 2019).

O solo é impermeabilizado visando proteger e impedir a infiltração do chorume, líquido originado dos processos biológicos, químicos e físicos da decomposição de resíduos orgânicos, para o subsolo e aquíferos existentes (Figura 5). A drenagem dos lixiviados é executada através de uma rede de drenos internos que levam o chorume para um sistema de tratamento diferente do que ocorria com os antigos lixões, o qual impede a contaminação do solo e do lençol freático (WORKMAN e KEEBLE, 1989; LEME, 2013).

Figura 5 – Seção de um aterro sanitário



Fonte: ASSAD (2012)

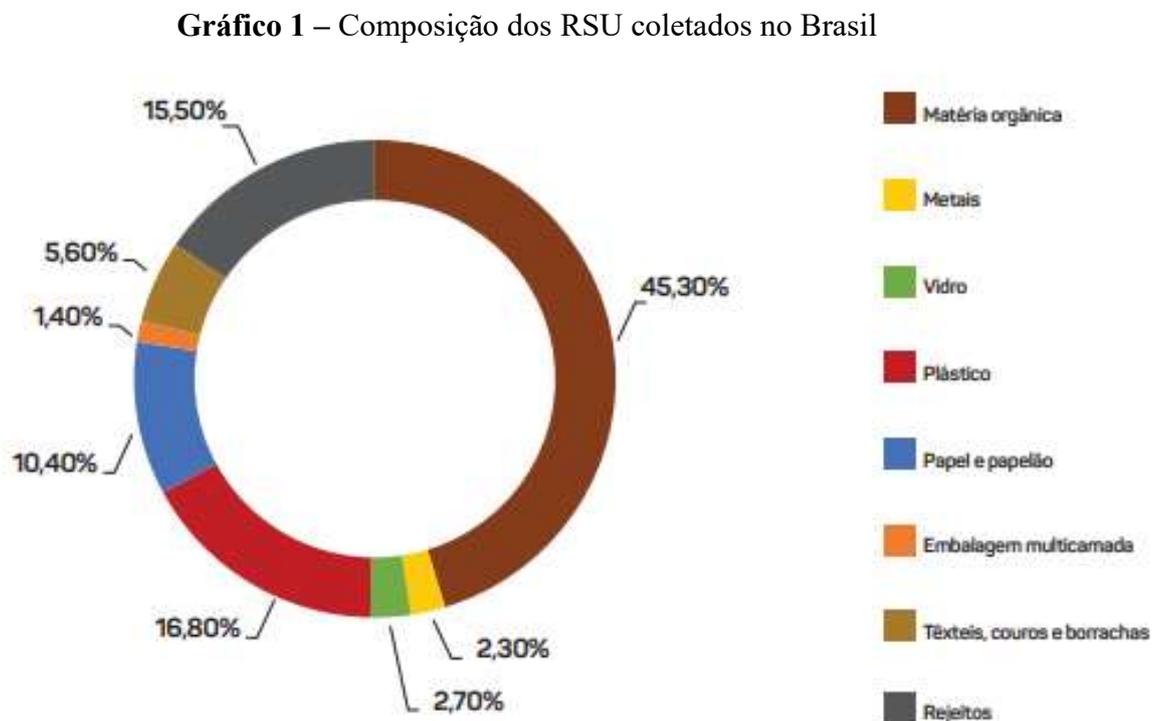
Segundo a Resolução CONAMA nº 01 de 1986, esse tipo de empreendimento é considerado modificador do meio ambiente e, para sua instalação e operação, deve ser submetido a um processo de licenciamento ambiental junto ao órgão licenciador competente (BRASIL, 1986).

Para isso, deve-se, prioritariamente, elaborar um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), a ser analisado pelo órgão licenciador competente. Esses estudos devem ser elaborados de acordo com os dispositivos legais pertinentes (legislação federal, legislação estadual e Instrução Técnica ou Termo de Referência). Cabendo a empresa que realiza o estudo atender aos critérios e às diretrizes desses dispositivos legais, e ao órgão licenciador competente analisar e decidir quanto a viabilidade ambiental, para assim, fornecer a licença ao empreendimento (CETESB, 1999).

2.3 Impactos ambientais decorrentes dos aterros sanitários

O número de aterros sanitários no Brasil tem aumentado, e embora sejam considerados a forma mais apropriada de destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), esses empreendimentos podem causar impactos ambientais significativos quando mal planejados e/ou administrados (MMA, 2018).

Dentre os principais impactos ambientais resultantes da má gestão e disposição inadequada de resíduos sólidos, destacam-se a contaminação de cursos d'água, degradação do solo, poluição do ar, aumento das enchentes e proliferação de animais transmissores de doenças. Esses efeitos são causados pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos em grande porcentagem descartados (Gráfico 1), resultando na produção significativa de chorume e biogás (LIMA, 2007).



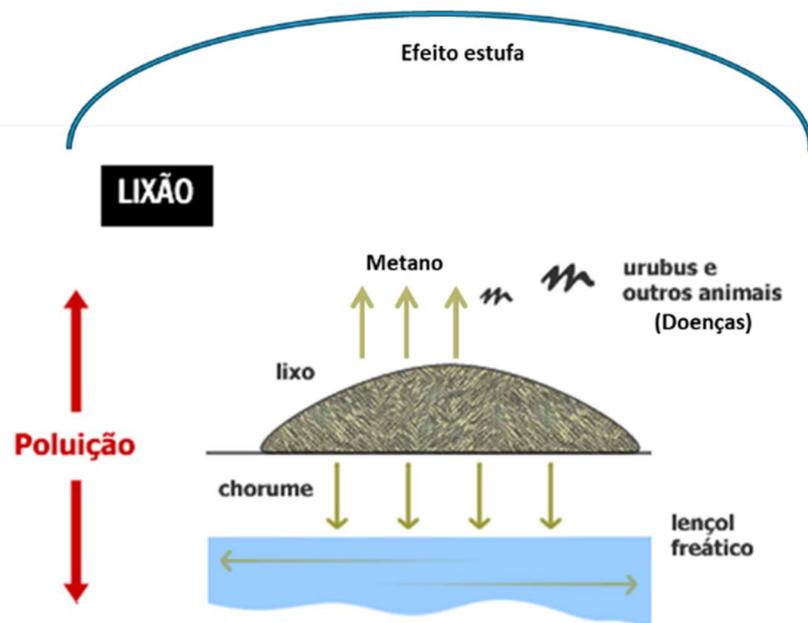
Fonte: ABRELPE (2020)

A poluição do ar ocorre principalmente devido à queima irregular de resíduos, sem supervisão adequada de suporte técnico qualificado durante a operação. Além disso, inicia-se o processo de decomposição anaeróbica, gerando uma alta produção de biogás composto por cerca de 60% de metano (CH₄), 35% de dióxido de carbono (CO₂) e 5% de outros gases. Portanto, é classificado como poluente atmosférico devido ao potencial desses gases em causar o efeito estufa (MATOS et al., 2011; CHAVES et al., 2015).

Outro fator significativo que contribui para impactos negativos nos aterros é a formação de chorume, um líquido escuro resultante da decomposição da matéria orgânica, capaz de contaminar o solo, as águas subterrâneas e superficiais por meio da infiltração e percolação, podendo atingir o lençol freático (SALES et al., 2014; BARROS et al., 2015). Além disso, podem se formar gases tóxicos, asfíxiantes e explosivos, acumulando-se no subsolo ou sendo liberados na atmosfera. É importante destacar que os locais utilizados para o armazenamento e a destinação final dos resíduos também contribuem para a proliferação de vetores de doenças, tanto em nível macro quanto micro (Figura 6) (OLIVEIRA et al., 2015; MEDEIROS, 2016).

Governos, empresários e a população em geral têm reconhecido que a falta de controle sobre os processos que causam alterações ambientais resulta em prejuízos em âmbitos locais, regionais e globais (Quadro 1). Diante disso, torna-se imperativo o desenvolvimento de políticas públicas para mitigar os problemas decorrentes dos resíduos gerados pelas diversas atividades humanas (ROUSSOULIÈRES et al., 2013).

Figura 6 – Impactos ambientais de aterros



Fonte: Adaptado CÉSAR (2015)

Quadro 1 – Aspectos e impactos ambientais

Atividade	Aspecto	Impacto
Preparação do local para recebimento dos resíduos	Emissão de material particulado	Alteração da qualidade do ar
	Exposição do solo	Alteração da qualidade do solo
		Aceleração de processos erosivos
	Exposição direta dos resíduos	Riscos à saúde humana
	Geração de emprego	Aumento da renda
	Movimentação de veículos	Compactação do solo
		Aumento do nível de ruídos
Afugentamento da fauna		
Morte de animais silvestres		
Emissão de ruídos	Riscos à saúde humana	
Controle de quantidade dos RSU	Emissão de gases	Alteração das características do ar
	Geração de emprego	Aumento na renda
	Movimentação de veículos	Compactação do solo
Disposição dos resíduos	Geração de gases e odores	Alteração na qualidade do ar
		Aumento de micro e macro vetores
	Acúmulo de resíduos	Intrusão visual
		Poluição visual
	Escolha do local	Desvalorização dos imóveis e terrenos
Resíduos levados pelo vento	Poluição nas áreas vizinhas	
Drenagem de gases	Promoção da qualidade ambiental	Diminuição da poluição do ar
Tratamento de lixiviado	Manejo adequado do lixiviado	Redução do risco de contaminação do lençol freático
		Redução do risco de contaminação das águas superficiais
		Redução do risco de contaminação do solo
Cobertura dos resíduos na célula	Retirada do solo	Poluição do ar
		Alteração do perfil do solo
		Alteração da paisagem
	Movimentação de veículos	Compactação do solo
		Proteção à saúde humana
		Melhoria da qualidade de vida
Controle de vetores	Qualidade de vida	Melhoria na saúde dos trabalhadores
Manutenção do sistema viário	Movimentação de veículos	Compactação do solo
	Proteção à saúde humana	Diminuição dos riscos de acidentes
Monitoramento ambiental	Contratação de profissionais	Aumento da renda
	Qualidade ambiental	Melhoramento na saúde humana

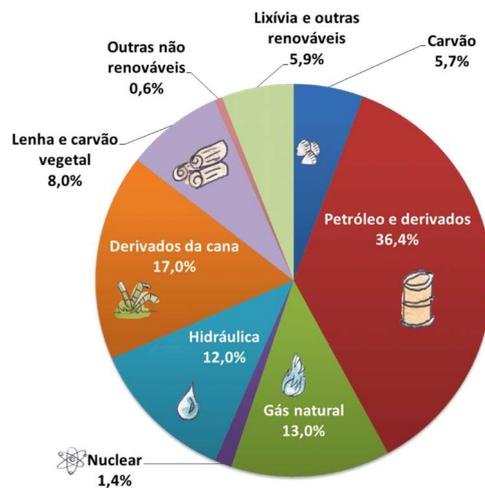
Fonte: MARTILDES et al. (2020)

2.4 Produção de biogás em aterros sanitários como fonte de energia

A escassez de energia é outro desafio significativo para a sustentabilidade. O ritmo acelerado da urbanização levou à necessidade de uma grande quantidade de energia para preencher a lacuna entre a demanda e a oferta. A geração convencional de energia não é suficiente para suprir a energia necessária, e os resíduos são amplamente utilizados como fontes alternativas de energia para superar esses desafios de meio ambiente e segurança energética (CHOUDHARY, 2017).

É evidente que no Brasil ainda mantemos uma dependência significativa dos derivados do petróleo, cientes de que essa é uma fonte de energia finita. Este fato crucial nos instiga a iniciar uma transformação em nossa abordagem, atribuindo a devida importância às fontes de energia renováveis (Gráfico 2). Um exemplo concreto seria buscar um aproveitamento mais eficiente dos RSU (SOARES, 2013).

Gráfico 2 – Matriz Energética no Brasil em 2017



Fonte: ANSELMO (2020)

A estratégia de converter resíduos sólidos urbanos em energia pode ser compreendida como um processo de planejamento centrado na escolha de tecnologias de transformação de resíduos em energia que sejam economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis, com ênfase na produção de biogás para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável (SINHA et al., 2023).

Cerca de 60% desse biogás é composto por metano, enquanto os restantes 40% consistem em dióxido de carbono. O metano é reconhecido como um dos principais contribuintes para o aquecimento global e outros problemas ambientais. No entanto, devido ao

seu elevado potencial energético, é considerado um recurso renovável e pode ser capturado e utilizado como fonte de energia. Ele se apresenta como uma alternativa favorável aos combustíveis fósseis, com potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (ABEDI et al., 2023).

Quando uma usina de geração de energia é instalada em aterros sanitários, o metano é coletado por meio de tubulações e misturado com outros gases. Dessa forma, o metano transforma-se em combustível para impulsionar turbinas. Essas turbinas têm a capacidade de gerar eletricidade, consumindo o metano no processo de combustão (Figura 7). Um aterro que não adota essa solução simplesmente libera o metano no ambiente ou a queima antes da liberação, sem aproveitamento energético. Em geral, essa prática depende do tamanho do aterro, o que pode resultar em efeitos ambientais adversos (AZEVEDO et al., 2015).

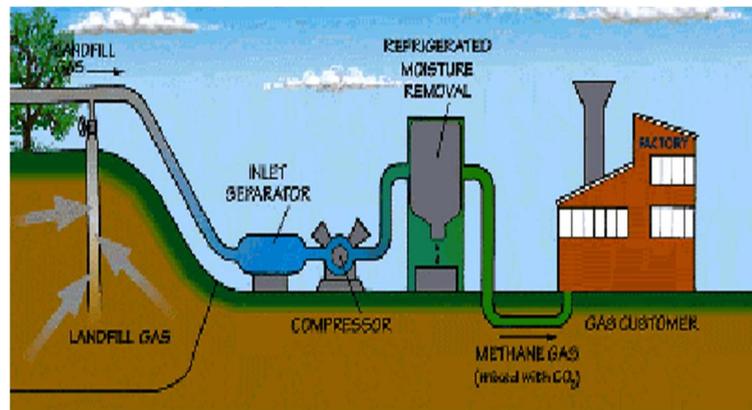
Figura 7 – Produção de energia em aterros sanitários



Fonte: CULTURAMIX (2014)

Para estabelecer um sistema completo e padronizado para a coleta de biogás, são essenciais poços de coleta, tubulações condutoras, um sistema de tratamento e um compressor (Figura 8). A duração de cada fase mencionada anteriormente varia de acordo com características específicas de cada aterro e os resíduos tratados nele. Quanto aos gases excedentes gerados durante o processo de coleta do biogás, estes são queimados como medida preventiva para evitar maiores impactos ambientais (Soares, 2013).

Figura 8 – Sistema de coleta de gás



Fonte: AL SEADI e HOLM (2004)

No ambiente do aterro sanitário, o método biológico de digestão anaeróbia desempenha um papel crucial na atenuação dos odores associados ao armazenamento e decomposição de resíduos, ao mesmo tempo em que elimina patógenos que representam um risco significativo para a saúde humana e animal (BATZIAS et al., 2005).

O material digerido resultante da produção de biogás também pode ser utilizado como fertilizante, apresentando um teor de nutrientes equivalente ao esterco. Isso proporciona benefícios econômicos adicionais ao reduzir a necessidade de fertilizantes químicos nas propriedades agrícolas, diminuir o escoamento de nutrientes e evitar as emissões de metano (THOMPSON et al., 2013).

Além dos benefícios econômicos associados à geração de energia e combustível, o método biológico oferece vantagens ambientais adicionais, contribuindo para a redução da poluição da água, solo e ar, entre outros aspectos (SCARLAT et al., 2018).

2.3.2 Perspectivas do aproveitamento do biogás de aterros sanitários

O manejo final dos resíduos sólidos urbanos tem representado um desafio significativo nos últimos anos. Desde os primeiros esforços para abordar as preocupações ambientais, como a Conferência de Estocolmo em 1972, surgiram reflexões sobre a notável acumulação de lixo. Essa acumulação é atribuída não apenas ao crescimento demográfico, mas principalmente à mudança no comportamento de consumo da sociedade contemporânea (LIMA et al., 2017).

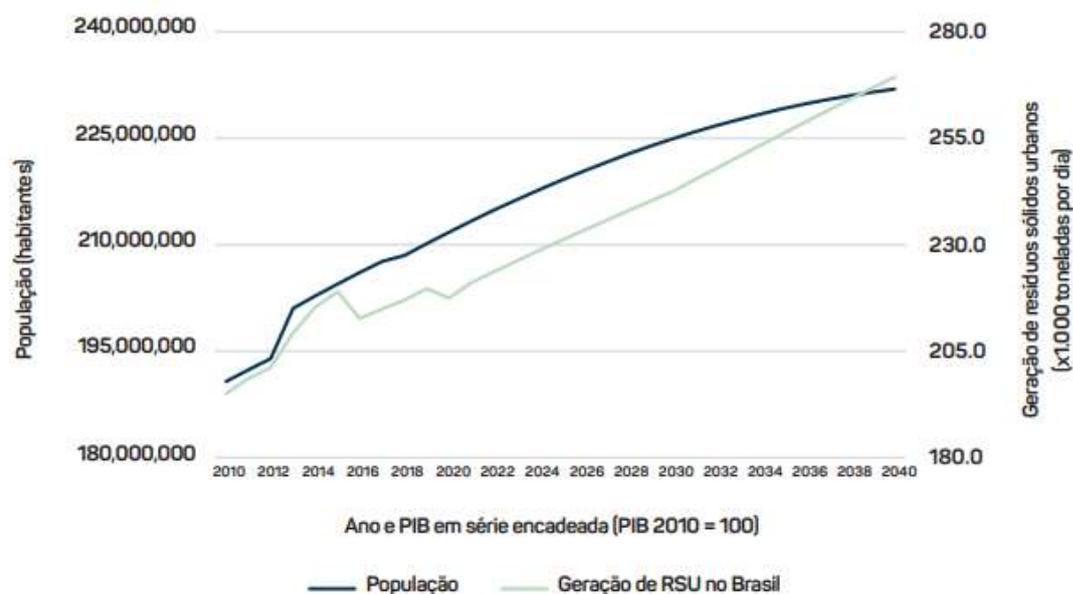
Com o contínuo aumento populacional e o consumo acentuado, é certo que esse problema se agravará, tornando imperativo o desenvolvimento de alternativas para a gestão de

resíduos. Nota-se que quanto mais a população aumenta em milhares de habitantes, aumenta também a produção de resíduos gerados pelos mesmos (Gráfico 3) (TENÓRIO e ESPINOSA, 2004). Em resposta a essa demanda, foram elaboradas e implementadas políticas públicas em âmbitos federal e estadual, buscando estabelecer e regular parâmetros apropriados para a disposição final de resíduos sólidos e efluentes (CALVIS e SILVA, 2018).

Conforme LIMA et al. (2017), existem usinas de recuperação energética do biogás de aterro sanitário, com um potencial de 117,76 Megawatts, sendo a maior concentração em São Paulo, com um potencial de 70,32 Megawatts. SANTOS et al. (2018) estimaram um potencial de geração de eletricidade a partir de biogás em aterros sanitários no país, que pode atingir até 1,7 Gigawatt.

O aproveitamento do biogás traz, de fato, uma série de benefícios, incluindo contribuições para a preservação ambiental, a diversificação da matriz energética em conformidade com as demandas globais e o apoio à sustentabilidade do aterro, entre outros aspectos. No entanto, essa prática ainda é percebida como pouco atrativa para o mercado, o que limita os investimentos substanciais. Nesse contexto, políticas públicas mais abrangentes, combinadas com estudos que comprovem a viabilidade do sistema, podem ser uma solução para estimular o mercado, unindo benefícios ambientais e retorno econômico (LIMA et al., 2017).

Gráfico 3 – Gráfico da produção de lixo em quilos por habitante por dia no Brasil



Fonte: PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (2022)

3 Considerações finais

Este trabalho ressalta a urgência de abordagens inovadoras na gestão de resíduos sólidos urbanos, tendo em vista os desafios impostos pelo crescimento populacional e pelos padrões de consumo industrial. A produção de biogás em aterros sanitários se destaca como uma solução viável, oferecendo benefícios ambientais consideráveis e contribuindo para a diversificação da matriz energética.

Ao converter resíduos em uma fonte de energia renovável, a digestão anaeróbia não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o metano, mas também oferece uma abordagem sustentável para o gerenciamento de resíduos urbanos. Além disso, discutimos as tecnologias de captação e produção de bioenergia como avanços fundamentais na proteção ambiental e na transição para um modelo energético mais sustentável.

Assim, ao apresentar o potencial da produção de biogás em aterros sanitários para a geração de energia, este trabalho propõe uma perspectiva inovadora para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos e promover práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos.

4 Referências bibliográficas

ABEDI, S.; NOZARPOUR, A.; TAVAKOLI, O. Avaliação da taxa de produção de biogás e tratamento de lixiviado em aterro sanitário através de uma estrutura denexo água-energia para gestão integrada de resíduos. **Energy Nexus**, v. 11, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100218>. Acesso em: 17 de nov. de 2023.

ABRELPE. **Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais**. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019, São Paulo: ABRELPE, 2019. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

ABRELPE. Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010/2011, São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 24 de nov. de 2023.

AGÊNCIA SENADO. **Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores**, 2021. Disponível em: Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores — Senado Notícias. Acesso em: 17 de nov. de 2023.

AL SEADI T.; HOLM-NIELSEN J. B. Utilização de resíduos provenientes de alimentos e agricultura. (Chap. VI. 1). Twardowska, Allen, Kettrup, Lacy (Eds) **Waste Management Series 4**. Solid Waste Assessment, Monitoring and Remediation Technologies for Solid Wastes Elsevier, Netherlands, p. 735–756, 2004. Disponível em: Acesso em: 21 de nov. de 2023.

ALVES, M. **Aterro sanitário precisa de leis e normas rigorosas para funcionar**. Agro 2.0, 2019. Disponível em: Aterro sanitário precisa de leis e normas rigorosas para funcionar (agro20.com.br). Acesso em: 18 de nov. de 2023.

ANSELMO, H. **O futuro da matriz energética no brasil e no mundo**. LFG – Engenharia e Telecom, 2020. Disponível em: O futuro da Matriz Energética no Brasil e no Mundo - LFG Engenharia e Telecom. Acesso em: 20 de nov. de 2023.

ASSAD, L. Aplicação de política nacional para resíduos sólidos pode transformar lixo em dinheiro. **Cienc. Cult.**, São Paulo, v. 64, n. 3, p. 07-09, 2012. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252012000300004&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 18 nov. 2023.

AZEVEDO, P. B.; LEITE, J. C. A.; OLIVEIRA, W. S. N.; SILVA, F. M.; FERREIRA, P. M. L. Diagnóstico da degradação ambiental na área do lixão de Pombal -PB. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.10, n.1, p. 20-34, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.18378/rvads.v10i1.3294>. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

BARROS, R. G.; DIAS, P. P.; ARAÚJO, V. K. A. Investigação de passivo ambiental na área do aterro sanitário de Hidrolândia, GO. **REGET/UFSM**. Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 73-82, 2015.

BATZIAS, F. A.; SIDIRAS, D. K.; SPYROU, E. K. Avaliação de dejetos de animais para produção de biogás: um método baseado em SIG. **Renewable Energy**, v. 30, ed. 8, p. 1161-1176, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.10.001>. Acesso em: 22 de nov. de 2023

BRASIL. Resolução CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental**. Brasília, DF, 1986.

CALVIS, L. O.; SILVA, W. G. CRESCIMENTO URBANO E PRODUÇÃO DE LIXO E RESÍDUO NA CIDADE DE CAMPO GRANDE (MS). **Geofronter**, 2020. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/GE>. Acesso em: 17 de nov. de 2023.

CÉSAR, A. **Introdução ao estudo da Química – Diferença entre Lixão, aterro sanitário e aterro controlado**. Curso de química, 2015. Disponível em: Química Geral – Aula 1.4– Introdução ao estudo da Química – Diferença entre Lixão, aterro sanitário e aterro controlado – CursodeQuímica.com | Curso de Química (wordpress.com). Acesso em: 17 de nov. de 2023.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Pesquisa sobre emissões de metano dos depósitos de lixo no Brasil**. São Paulo, 1999. Disponível em: <http://www.mct.gov.br>. Acesso em: 18 nov. 2023.

CHAVES, G. G.; SOARES, F. R.; SEO, E. S. M. Análise comparativa do desempenho ambiental de processos de destinação de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético. **InterfaceHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**. São Paulo, v. 10, n. 1, p. 117-124, 2015.

CHOUDHARY, T. Avaliação termodinâmica do ciclo híbrido SOFC-ICGT: análise de energia e minimização da geração de entropia. **Energy**, v. 134, p. 1013- 1028, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.064>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

CLARKE, B. O., et al. Investigando lixiviado de aterro sanitário como fonte de resíduos orgânicos traços. **Quimiosfera**, v.127, p. 269–275, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.030>. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

CULTURAMIX. **Biogases – Futura Fonte de Energia**. CullturaMix, 2014. Disponível em: Biogases - Futura Fonte de Energia | Meio Ambiente - Cultura Mix. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

FUNASA. **Fundação Nacional de Saúde**. Funasa. Brasília, 2006. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br>. Acesso em: 20 de nov. de 2023.

LEME, M. A. G. **Caracterização de Solo Utilizado no Sistema de Barreira Impermeabilizante de Base de uma Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2013. Campinas, SP. Dissertação (Mestrado) –Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2013.

LIMA et al. Análise da recuperação energética do biogás de aterros sanitários. **InterfaceHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**. São Paulo, v. 12, n. 1, p. 68-81, 2017.

LIMA, A.M.F. **Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil - Inserção de Perspectivas**. 2007. Salvador, BA. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, 2007.

LIU, J. et al. Melhorar a sustentabilidade holística do ecossistema urbano da estratégia de transformação de resíduos sólidos urbanos em energia usando análise contábil exergética estendida. **Science of The Total Environment**, v. 15, p. 166730, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166730>. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

MARTILDES, J. A. L.; FLORÊNCIO, P. R. C.; SILVA, A. F. L. R. A.; SILVA, R. A. F.; SILVA, E. M.; SANTOS, L. L. Identificação e avaliação de impactos ambientais na fase de operação do Aterro Sanitário de Campina Grande-PB. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.3, p.13395-13415, 2020. Disponível em: <https://10.34117/bjdv6n3-270>. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

MATHESON, T. O Descarte Não É Gratuito: Instrumentos Fiscais para Internalizar os Custos Ambientais dos Resíduos Sólidos. **Fundo Monetário Internacional**, 2019. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2019/12/20/Disposal-is-Not-Free-Fiscal-Instruments-to-Internalize-the-Environmental-Costs-of-Solid-Waste-48854>. Acesso em: 16 de nov. de 2023.

MATOS, F. O. et al. Impactos ambientais decorrentes do aterro sanitário da região Metropolitana de Belém-PA: Aplicação de ferramentas de melhoria ambiental. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia, v. 12, n. 39, p. 297-305, 2011.

MEDEIROS, M. C. **Panorama dos problemas ocasionados pela destinação inadequada dos resíduos sólidos do município de Paulista-PB, Brasil**. Congresso internacional da diversidade do semiárido – conidis, 1., 2016. Campina Grande. Anais... Campina Grande: REALIZE – eventos científicos e editora. 9 p, 2016.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Lixo -Um grave problema no mundo moderno**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/secex_consumo/_arquivos/8%20-%20mcs_lixo.pdf. Acesso em: 15 de nov. de 2023.

MONDAL, S.; BHASKAR, M. Avaliação da gestão de resíduos sólidos urbanos em uma cidade indiana Classe II utilizando abordagens geoespaciais e estatísticas: um estudo de caso do município de Rampurhat. **Waste Management Bulletin**, v. 1, ed. 4, p. 74-92, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.09.003>. Acesso em: 15 de nov. de 2023.

NANDA, S.; BERRUTI, F. Gestão de resíduos sólidos municipais e tecnologias de aterro sanitário: uma revisão. **Environmental Chemistry Letters**, v.19, p. 1433–1456, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>. Acesso em: 15 de nov. de 2023.

OLIVEIRA, A. L. et al. Análise qualitativa dos impactos ambientais no meio abiótico em um depósito de resíduos sólidos. **Enciclopédia Biosfera**. Goiânia, v.11, n. 22, p. 184-199, dez. 2015.

PETERSSON, A. et al. Biogas upgrading technologies–developments and innovations. **IEA bioenergy**, v. 20, p. 1-19, 2009. Disponível em: Acesso em: 21 de nov. de 2023.

PIMENTA, J. **Aterro Sanitário: como funciona, impactos e soluções**. Recicla.Club, 2021. Disponível em: Aterro Sanitário: como funciona, impactos e soluções (recicla.club). Acesso em: 19 de nov. de 2023.

PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Cenários para o plano nacional de resíduos sólidos**. Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Qualidade Ambiental, Brasília-DF, 2022. Disponível em: plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf (www.gov.br). Acesso em: 20 de nov. de 2023.

RIBEIRO, T. G. S.; SANTOS, A. R. R.; ERTHAL, M. **Gerenciamento dos resíduos provenientes do setor de tecnologia da informação do Instituto Federal Fluminense**. XVII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/marine-spolm2014-126492>. Acesso em: 20 de nov. de 2023.

RESÍDUOS SÓLIDOS. **Cadernos Educação Ambiental**, 2ª ed. 2014. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/cea/2014/11/6-RES%C3%84DUOS-S%C3%93LIDOS.pdf>. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

ROUSSOULIERES, E. G.; LIMA, P. A.; PIRES R. S. C.; VARGAS, A. B.; ALMEIDA, F. S. Questões ambientais versus economia em Sistemas de Gestão Ambiental: avanços e perspectivas. **Cadernos UniFOA** 22: p. 53-62, 2013.

SALES, M. L. S. et al. Aspectos e impactos ambientais perceptíveis dos resíduos sólidos: um estudo de caso no lixão de Assú (RN). **Revista Íbero-Americana de Ciências Ambientais**. Aquidabã, v. 5, n. 1, p. 265-283, 2014.

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N.D.B.; NÓBREGA, L.G.B.; BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G.L. Avaliação do potencial de produção de biogás a partir de vários resíduos orgânicos no Brasil: impacto na geração de energia, utilização e redução de emissões., **Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54-63, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>. Acesso em: 20 de nov. 2023.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogás: Desenvolvimentos e perspectivas na Europa. **Renewable Energy**, v. 129, p. 457 – 472, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>. Acesso em: 16 de nov. de 2023.

SELURB. **PricewaterhouseCoopers**. Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana. Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana. 2019.

SINHA, A. A. et al. Uma nova comparação entre a exergia energética e a análise de sustentabilidade para a configuração híbrida integrada de turbina a gás de célula a gás movida a biomassa. **Energy Conversion and Management**, v. 283, p. 116923, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116923>. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

SOARES, L. E. **Aterros sanitários com aproveitamento energético no Brasil: eficiência energética e análise de potencialidades futuras**. 2013. Lavras, MG. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Formas Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, 2013.

TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. **Curso de Gestão Ambiental**. Editora Manole, 2004.

THOMPSON, E.; WANG, Q.; LI, M. Sistemas de Digestores Anaeróbios (ADAs) para várias fazendas leiteiras: Uma análise GIS para seleção ótima de locais. . **Energy Policy**, v. 61, p. 114 – 124, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.035>. Acesso em: 19 de nov. de 2023.

TORRE, L.; CAMPOS, M.; BOURGUIGNON, N.; PREST, M. **A vida no lixo – Nos lixões, vidas em risco na luta pela sobrevivência**. A Gazeta, 2017. Disponível em: A Gazeta | Nos lixões, vidas em risco na luta pela sobrevivência (gazetaonline.com.br). Acesso em: 20 de nov. de 2023.

WORKMAN, J. P.; KEEBLE, R. L. Projeto e construção de sistemas de revestimento. In: CHISTENSEN, T. H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. **Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact**. London: Academic Press, 1, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-174255-3.50022-0>. Acesso em: 17 de nov. de 2023.