

**INSTITUTO FEDERAL**  
**GOIANO**  
Câmpus Rio Verde

**ENGENHARIA AMBIENTAL**

**A GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM ATERROS  
SANITÁRIOS: BIOGÁS E SOLAR FOTOVOLTAICA**

**GABRIELLE APARECIDA ARANTES MARTINS**

**RIO VERDE, GO**  
**2025**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO CAMPUS RIO VERDE GOIÁS**

**ENGENHARIA AMBIENTAL**

**A GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM ATERROS  
SANITÁRIOS: BIOGÁS E SOLAR FOTOVOLTAICA**

**GABRIELLE APARECIDA ARANTES MARTINS**

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto  
Federal Goiano – Câmpus Rio Verde, como  
requisito parcial para obtenção do Grau de  
Bacharel em Engenharia Ambiental

Orientador: Dr. Bruno de Oliveira Costa Couto

RIO VERDE – GO

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M386a Martins, Gabrielle Aparecida Arantes  
A Geração de Energias Renováveis em Aterros Sanitários:  
Biogás e Solar Fotovoltaica / Gabrielle Aparecida Arantes  
Martins. Rio Verde 2025.

61f. il.

Orientador: Prof. Dr. Bruno de Oliveira Costa Couto.  
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220074 -  
Bacharelado em Engenharia Ambiental - Integral - Rio Verde  
(Campus Rio Verde).

1. recuperação energética. 2. resíduos sólidos. 3. energia híbrida.  
4. sustentabilidade ambiental. I. Título.

## Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

### ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 20 dias do mês de junho de dois mil e vinte e cinco às 15 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Bruno de Oliveira Costa Couto, orientador, Prof. Patrícia Caldeira de Souza, membro interno, Prof. Andriane de Melo Rodrigues, membro interno, para examinar o Trabalho de Curso (TCC) intitulado, **A Geração de Energias Renováveis em Aterros Sanitários: Biogás e Solar Fotovoltaica**, de Gabrielle Aparecida Arantes Martins, estudante do curso de Engenharia Ambiental do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2017102200740297. A palavra foi concedida à estudante para a apresentação oral do trabalho, em seguida houve arguição da candidata pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela aprovação da estudante, com orientação de correção. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que segue assinada pela professora orientadora e segue assinada por todos os membros da banca.

Rio Verde, 20 de junho de 2025.

Bruno de Oliveira Costa Couto

Presidente da banca/orientadora

*assinatura digital*

Patrícia Caldeira de Souza

Membro da Banca Examinadora

*assinatura digital*

Andriane de Melo Rodrigues

Membro da Banca Examinadora

*assinatura digital*

Documento assinado eletronicamente por:

- **Bruno de Oliveira Costa Couto**, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC0001 - CCBEAMB-RV , em 23/06/2025 10:46:06.
- **Andriane de Melo Rodrigues**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 24/06/2025 12:52:53.
- **Patricia Caldeira de Souza**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 24/06/2025 13:23:10.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/06/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 718635

**Código de Autenticação:** a07fd4696e



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela oportunidade de chegar até aqui com saúde e determinação, mesmo diante das dificuldades que surgiram ao longo do caminho.

À minha mãe, Genilse, meu reconhecimento e gratidão por todo o apoio, cuidado e incentivo durante toda minha vida. Estendo esse agradecimento ao meu pai, Orivaldo, e às minhas irmãs, Priscylla e Brunna, por todo apoio, paciência e motivação, vocês fazem parte de cada conquista minha. Às minhas sobrinhas, Emanuely, Valentina, Luisa e Rafaella, que me inspiram todos os dias com sua alegria e carinho.

Agradeço também às minhas primas Daiane e Emelly, ao meu cunhado Guilherme, aos meus tios e avós, ao meu amigo, Fábio Júnior, à minha amiga e colega de turma Lorryna, com quem compartilhei toda a jornada desde o início da graduação. O apoio, a parceria e a presença de cada um de vocês fizeram toda a diferença ao longo desse caminho.

Ao meu orientador, Dr. Bruno Couto, meu muito obrigada pela paciência, orientações e pela atenção dedicada à construção deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para a conclusão desta etapa.

Chegar ao final da graduação representa, para mim, não apenas o encerramento de um ciclo acadêmico, mas um passo significativo para o meu futuro profissional, construído com superação e com o apoio de pessoas que estiveram ao meu lado nos momentos certos.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, deixo meu sincero agradecimento.

## RESUMO

MARTINS, GABRIELLE APARECIDA ARANTES. **Energias Renováveis em Aterros Sanitários: Biogás e Solar Fotovoltaica**. 2025. 61p. Monografia (Curso Bacharelado em Engenharia Ambiental). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2025.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) representam um dos maiores desafios ambientais atuais, devido aos seus impactos negativos sobre o solo, a água e o ar. A consolidação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) impulsionou a adoção de aterros sanitários como forma mais adequada de destinação, despertando também o interesse por soluções sustentáveis que promovam a valorização dos resíduos. Este trabalho tem como objetivo analisar o potencial de geração de energia elétrica em aterros sanitários, por meio da recuperação do biogás proveniente da decomposição dos resíduos e da instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica em aterros encerrados, com ênfase nos aspectos técnicos, ambientais, legais e socioeconômicos envolvidos. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica exploratória com base em fontes nacionais e internacionais. Os resultados evidenciam que o uso do biogás como fonte energética já está presente em alguns municípios brasileiros, demonstrando viabilidade técnica, benefícios ambientais e potencial de integração à matriz elétrica nacional, embora ainda subutilizado. A aplicação de sistemas fotovoltaicos em aterros encerrados, embora menos comum no país, apresenta-se como alternativa promissora para o aproveitamento de áreas com uso restrito. Ambas as tecnologias oferecem vantagens, como a geração de energia limpa, a valorização dos resíduos e o incentivo à geração distribuída, embora apresentem desafios como custos iniciais elevados, exigências regulatórias e limitações técnicas. A integração dessas fontes em sistemas híbridos pode ampliar a estabilidade da geração e promover o uso mais racional do espaço. Conclui-se que, tanto isoladamente quanto de forma combinada, essas soluções contribuem para uma gestão mais eficiente dos aterros sanitários e para o fortalecimento da sustentabilidade na matriz energética brasileira.

**Palavras-chave:** recuperação energética, resíduos sólidos, energia híbrida, sustentabilidade ambiental.

## ABSTRACT

MARTINS, GABRIELLE APARECIDA ARANTES. **Renewable Energy in Landfills: Biogas and Solar Photovoltaics**. 2025. 61p. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Environmental Engineering). Federal Institute of Education, Science and Technology of Goiás – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, Brazil, 2025.

Municipal solid waste (MSW) is one of the major environmental challenges we face today due to its negative impacts on soil, water, and air. The consolidation of Brazil's National Solid Waste Policy (Law No. 12.305/2010) has promoted the adoption of landfills as the most suitable form of waste disposal while also encouraging sustainable solutions that foster waste recovery. This study aims to analyze the potential for electricity generation in sanitary landfills through the recovery of biogas from waste decomposition and the installation of photovoltaic solar systems in closed landfills, with emphasis on the technical, environmental, legal, and socioeconomic aspects involved. The research was conducted through an exploratory literature review based on national and international sources. The results show that biogas use is already implemented in some Brazilian municipalities, demonstrating technical feasibility, environmental benefits, and potential for integration into the national energy matrix, although still underutilized. The application of photovoltaic systems in closed landfills, while less common in the country, emerges as a promising alternative for repurposing restricted-use areas. Both technologies offer advantages such as clean energy generation, waste valorization, and support for distributed generation, but also face challenges including high initial costs, regulatory requirements, and technical limitations. The integration of these sources into hybrid systems may improve generation stability and promote more rational land use. It is concluded that, whether applied separately or in combination, these solutions contribute to more efficient landfill management and strengthen the sustainability of Brazil's energy matrix.

**Key-words:** energy recovery, solid waste, hybrid energy, environmental sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Impactos da disposição de resíduos em lixões a céu aberto .....	19
<b>Figura 2:</b> Esquema básico de um aterro controlado.....	20
<b>Figura 3:</b> Esquema básico de um aterro sanitário. ....	21
<b>Figura 4:</b> Esquema da decomposição anaeróbia. ....	24
<b>Figura 5:</b> Etapas do funcionamento de um motor ciclo Otto. ....	28
<b>Figura 6:</b> Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	31
<b>Figura 7:</b> Sistemas de seguimento solar de um (a, b) e dois (c) eixos. ....	34
<b>Figura 8:</b> Layout de um sistema off-grid. ....	35
<b>Figura 9:</b> Principais tipos de fundações utilizadas para sistemas fotovoltaicos em aterro.....	38
<b>Figura 10:</b> Exemplo de projeto conceitual de energia solar fotovoltaica e biogás em um aterro sanitário. ....	42
<b>Figura 11:</b> Mapa de Localização do Aterro Battre em Salvador. Fonte: Mapa elaborado pela autora (2025) .....	43
<b>Figura 12:</b> (a) Vista aérea Termoverde (b) Módulos de geração de energia.....	44
<b>Figura 13:</b> Mapa de Localização do Aterro Sanitário Caximba.....	45
<b>Figura 14:</b> (a) Vista aérea da usina fotovoltaica. (b) Posicionamento das estruturas.....	46
<b>Figura 15:</b> Vista aérea do Aterro de Cascavel no Paraná.....	47
<b>Figura 16:</b> (a) Usina fotovoltaica do aterro (b) Geradores de eletricidade. ....	48

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Comparação entre diferentes tipos de tecnologias de depósitos de RSU. ....	18
<b>Quadro 2:</b> Diferentes utilizações para o biogás. ....	25
<b>Quadro 3:</b> Vantagens, desvantagens, porte e custos das tecnologias utilizadas. ....	29
<b>Quadro 4:</b> Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos.....	33
<b>Quadro 5:</b> As fases para a detecção de um possível local. ....	37
<b>Quadro 6:</b> Desafios e soluções potenciais para instalação de painéis solares.....	40
<b>Quadro 7:</b> Vantagens e desvantagens do uso de energias renováveis em aterro. ....	52

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

<b>%</b>	Porcentagem
<b>(c-Si)</b>	Silício cristalino
<b>°C</b>	Grau Celsius
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>ANP</b>	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<b>CC/CA</b>	Inversores de corrente contínua para corrente alternada
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CIGS</b>	(Di)seleneto de cobre, índio e gálio
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>ER</b>	Energia renovável
<b>ERs</b>	Energias renováveis
<b>GWh</b>	Gigawatt-hora
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrogênio
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Gás sulfídrico
<b>Kg</b>	Quilograma
<b>KW</b>	Quilowatt
<b>KWh</b>	Quilowatt-hora
<b>kWh/m<sup>2</sup></b>	Quilowatt-hora por metro quadrado
<b>kWh/m<sup>2</sup>/ano</b>	Quilowatt-hora por metro quadrado por ano
<b>LandGEM</b>	Landfill Gas Emissions Model (Modelo de emissões de gases de aterro)
<b>LFG</b>	Landfill Gas (Gás de aterro sanitário)
<b>m<sup>3</sup>/ano</b>	Metros cúbicos por ano
<b>MW</b>	Megawatt
<b>MWh</b>	Megawatt-hora
<b>MWp</b>	Megawatt-pico
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amônia
<b>Off-grid</b>	Sistema isolado da rede elétrica
<b>On-grid</b>	Sistema conectado à rede elétrica
<b>pH</b>	Potencial hidrogeniônico
<b>PNRS</b>	Política Nacional de Resíduos Sólidos

<b>ProGD</b>	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
<b>R\$</b>	Real (moeda brasileira)
<b>RenovaBIO</b>	Política Nacional de Biocombustíveis
<b>RSU</b>	Resíduo Sólido Urbano
<b>RSUs</b>	Resíduos Sólidos Urbanos
<b>SPVS</b>	Sistema de Produção de Vapor Superaquecido
<b>Ton</b>	Tonelada
<b>US\$</b>	Dólar americano

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	Objetivo Geral.....	16
1.2	Objetivo Específico.....	16
2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
3.1	Resíduos Sólidos .....	17
3.1.1	Disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) .....	18
3.2	A Importância dos RSUs na Geração de Energia.....	22
3.3	Fontes de Energia Renováveis.....	22
3.4	Biodigestão Anaeróbia: Geração de Biogás, Purificação e Uso .....	23
3.4.1	Utilização do biogás.....	25
3.4.2	Geração de biogás em aterros sanitários .....	25
3.4.3	Sistema de operação, extração e tratamento do biogás do aterro .....	26
3.4.3.1	Tecnologias para geração de energia elétrica a partir do biogás.....	28
3.4.4	Desafios na geração de energia a partir do biogás em aterros sanitários .....	29
3.5	Energia Fotovoltaica .....	30
3.5.1	Os principais tipos de células fotovoltaicas existentes.....	31
3.5.2	Demais estruturas componentes do sistema fotovoltaico .....	33
3.5.3	Tipos de Sistemas Fotovoltaicos .....	34
3.5.3.1	Sistemas isolados (OFF-Grid) .....	34
3.5.3.2	Sistemas interligados à rede (ON-Grid).....	35
3.5.3.3	Sistemas fotovoltaicos híbridos .....	36
3.6	Sistemas Fotovoltaicos em Aterros Desativados .....	36
3.6.1	Sistemas de montagem e tecnologias solares em aterros sanitários.....	37
3.6.2	Desafios da instalação de sistemas fotovoltaicos em aterros .....	39
3.7	Sistemas Híbrido (Biogás + Energia Solar) .....	41
3.7.1	Desafios na implementação de sistemas híbridos .....	42
3.8	Casos de Geração de Energias Renováveis em Aterros Sanitários .....	43
3.8.1	Biogás (Aterro Sanitário de Salvador – Bahia).....	43
3.8.2	Solar fotovoltaica (Aterro sanitário Caximba – Paraná) .....	45
3.8.3	Sistema híbrido (Aterro Sanitário de Cascavel – Paraná) .....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
4.1	Aspectos Ambientais, Sociais e Econômicos da Adoção do Sistema Híbrido de Geração de Energia (Biogás + Solar) em Aterros Sanitários. ....	49
4.1.1	Benefícios ambientais .....	49
4.1.2	Benefícios sociais .....	49
4.1.3	Benefícios econômicos.....	50

4.2	Vantagens e Desvantagens Geração de Energia renovável em Aterros Sanitários.....	50
4.3	Perspectivas Futuras do Uso de Energias Renováveis em Aterros Sanitários no Brasil e no Mundo	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	53
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## 1 INTRODUÇÃO

Fundamental para a geração de riquezas industriais, comerciais e sociais, a eletricidade também garante conforto e mobilidade às pessoas. Por outro lado, a geração e o consumo de energia exercem impactos sobre o meio ambiente: emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos, uso do solo, geração de resíduos e derramamentos de hidrocarbonetos.

As discussões sobre os desafios ambientais e sociais relacionados à dependência dos combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis de geração de energia limpa a partir de fontes renováveis (COLDEBELLA, 2006).

Juntamente com esta problemática, existe a questão da gestão de resíduos sólidos urbanos, que é um problema atual em todo o mundo e que vem sendo também amplamente discutida (FREITAS, 2012). No Brasil, cada habitante produz, em média, 1,237 kg de resíduo sólido urbano por dia, segundo dados de 2024, o que evidencia o alto volume gerado diariamente e reforça os desafios enfrentados na gestão desses resíduos (ABREMA, 2024).

A gestão adequada de resíduos em aterros sanitários e seu posterior reaproveitamento é uma alternativa ambientalmente sustentável, pois há a oportunidade de geração de energia renovável, bem como a redução da emissão de gases de efeito estufa (OLIVEIRA *et. al*, 2017). O biogás gerado nos aterros sanitários é composto basicamente por metano ( $\text{CH}_4$  – de 55 a 65%), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$  – de 35 a 45%), nitrogênio ( $\text{N}_2$  – de 0 a 1%), hidrogênio ( $\text{H}_2$  – de 0 a 1%) e gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$  – de 0 a 1%) (ABREU, 2009). A elevada concentração de metano no biogás, garante um alto poder calorífico, o que aumenta significativamente sua eficiência na geração de eletricidade em motores a combustão (MAGALHÃES, 1986).

O aproveitamento energético do biogás gerado em aterro constitui-se em alternativa interessante, uma vez que o crescimento econômico do país demanda cada vez mais a disponibilização de energia (SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013).

Outra forma de geração de energia em aterros é a energia Solar Fotovoltaica, também conhecido como “Aterro Solar”. O conceito de aterro solar refere-se a sistemas fotovoltaicos solares instalados em aterros encerrados, gerando assim eletricidade renovável e utilizando terras frequentemente consideradas inutilizáveis (RODRIGUES, 2019). Segundo Folster (2019) para determinação do potencial de geração solar fotovoltaica em aterros é necessário determinar a área disponível e calcular a potência e a energia que podem ser geradas nesta área.

Dessa forma, este trabalho busca avaliar o potencial de geração de energia elétrica em aterros sanitários, através do aproveitamento do biogás na fase ativa e da energia solar fotovoltaica na fase pós-operacional, como estratégias para a produção de energia limpa.

## 1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aproveitamento energético de aterros sanitários por meio da geração de biogás durante sua operação ativa e da implantação de sistemas de energia solar fotovoltaica em sua fase pós-operacional, destacando a viabilidade técnica, ambiental e socioeconômica dessas alternativas.

## 1.2 Objetivo Específico

- Analisar a importância da disposição adequada de resíduos sólidos urbanos;
- Investigar o potencial de geração de energia a partir do biogás em aterros sanitários ativos, com foco nos aspectos técnicos e ambientais;
- Investigar a viabilidade da implantação de sistemas fotovoltaicos em aterros sanitários desativados, considerando aspectos estruturais e operacionais;
- Identificar e discutir os benefícios ambientais, sociais e econômicos decorrentes da adoção de sistemas híbridos de geração de energia (biogás + solar) em áreas de disposição final de resíduos

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo trata de uma revisão de literatura narrativa, de natureza qualitativa, com abordagem exploratória e descritiva, que teve como objetivo investigar informações sobre uso do biogás e energia solar fotovoltaica em aterros sanitários como fonte alternativas de geração de energia.

Segundo Rother (2007), a revisão narrativa tem como objetivo apresentar e discutir o estado da arte de determinado tema, sem a aplicação de critérios estatísticos rigorosos, mas com análise crítica e interpretativa dos estudos encontrados.

Essa pesquisa fornece o suporte necessário para todas as etapas de uma investigação, ajudando na definição do problema, na determinação dos objetivos, na construção de hipóteses, na justificativa da escolha do tema e na elaboração do relatório final (BRITO; OLIVEIRA; SILVA, 2021).

Neste artigo é feita uma revisão da bibliografia a partir de artigos sobre a temática encontrados nas bases de dados como LILACS, SciELO, Science Direct, Google Scholar, CAPES e Elsevier, até o ano de 2025. Além de livros, teses, revistas científicas, artigos acadêmicos e documentos oficiais, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº

12.305/2010), também foram incluídas fontes institucionais, sites oficiais e portais locais. Essa ampliação de fontes foi necessária devido à escassez de estudos científicos consolidados, especialmente no contexto nacional, sobre algumas das tecnologias abordadas neste trabalho. A utilização dessas fontes complementares possibilitou a obtenção de dados técnicos e exemplos práticos sobre soluções que ainda são pouco difundidas e exploradas academicamente no Brasil. Os seguintes descritores foram aplicados: energias renováveis, resíduos sólidos urbanos, disposição final resíduos sólidos urbanos, energia fotovoltaica, aterros solares, geração biogás de aterro. Em Inglês: renewable energies, urban solid waste, urban solid waste final disposal, photovoltaic energy, solar landfills, landfill biogas generation.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Resíduos Sólidos**

Os resíduos sólidos são todo material que deixam de ser usados em atividades humanas como por exemplo, substância, objeto ou bem descartado podendo ser de origem sólida ou semissólida (LEITE; BELCHIOR, 2014).

O conceito de resíduos sólidos variou ao longo do tempo, em função dos avanços tecnológicos, da conscientização ambiental, e da necessidade financeira de reaproveitamento de materiais que não são mais úteis para um determinado fim, mas podem servir de matéria-prima para outro (SANTAELLA, 2014).

Alguns fatores provocam a origem e a produção dos resíduos sólidos no meio urbano, tais como, quantidade populacional, mudanças nas estações do ano, hábitos da população, grau educacional, variações climáticas, condições financeiras e competência na coleta de resíduos (CONTO *et. al*, 2004).

A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, classifica os resíduos sólidos conforme sua origem, como domiciliar, industrial, de saúde, entre outros, e os divide em perigosos e não perigosos, sendo considerados perigosos aqueles que oferecem riscos à saúde ou ao meio ambiente (BRASIL, 2010)

Segundo Velozo (2006) embora o tratamento e disposição final deve ser diferenciado para cada classe de resíduos, isso nem sempre ocorre, sendo que usualmente são descartados resíduos potencialmente perigosos juntamente com os resíduos domésticos.

A problemática ambiental gerada pelo lixo é de difícil solução e a maior parte das cidades brasileiras apresenta um serviço de coleta que não prevê a segregação dos resíduos na fonte (MUCELIN; BELLINI, 2008).

### 3.1.1 Disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU)

As áreas mais comuns de contaminação no Brasil são aquelas usadas para disposição de resíduos, especialmente lixões e céu aberto (VELOZO, 2006). Os impactos ambientais negativos incluem a poluição do solo e da água por resíduos dispostos inadequadamente, como em fundos de vale e margens de rios (MUCELINI; BELLINI, 2008).

A disposição final do lixo é um dos grandes problemas ambientais dos centros urbanos e tende a se agravar com o aumento do consumo de descartáveis, que ampliam os volumes gerados pela população (ENSINAS, 2003).

Em 2023, aproximadamente 85,6% dos resíduos sólidos urbanos no Brasil tiveram algum tipo de destinação final, sendo que 58,5% foram encaminhados a aterros sanitários, considerados ambientalmente adequados (ABREMA, 2024). Já 41,5% dos resíduos foram destinados de forma inadequada, como em lixões, valas e outros locais irregulares, o que evidencia que o país ainda enfrenta sérias dificuldades na gestão correta dos resíduos (ABREMA, 2024).

Apesar do encerramento oficial do prazo para erradicação dos lixões em 2024, a meta ainda está distante de ser cumprida e esses locais seguem recebendo uma parcela significativa dos resíduos (ABREMA, 2024).

O Quadro 1 apresenta uma comparação entre os diferentes tipos de depósitos de RSU, suas práticas operacionais e a forma de tratamento de chorume e biogás.

**Quadro 1:** Comparação entre diferentes tipos de tecnologias de depósitos de RSU (com base na Lei nº 12.305/2010)

Medidas Operacionais		Tratamento de Chorume	Gestão do Biogás
Lixões	Disposição inadequada de resíduos sólidos, em desacordo com as diretrizes da política nacional.	Inexistente.	Inexistente.
Aterros Controlados	Prática de disposição que não atende plenamente aos critérios técnicos de engenharia e controle ambiental.	Parcial ou ausente, sem impermeabilização eficiente.	Ausência de aproveitamento energético.
Aterros Sanitários	Destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos, com controle de poluição e operação técnica.	Tratamento completo com impermeabilização, drenagem e monitoramento.	Coleta e aproveitamento energético do biogás.

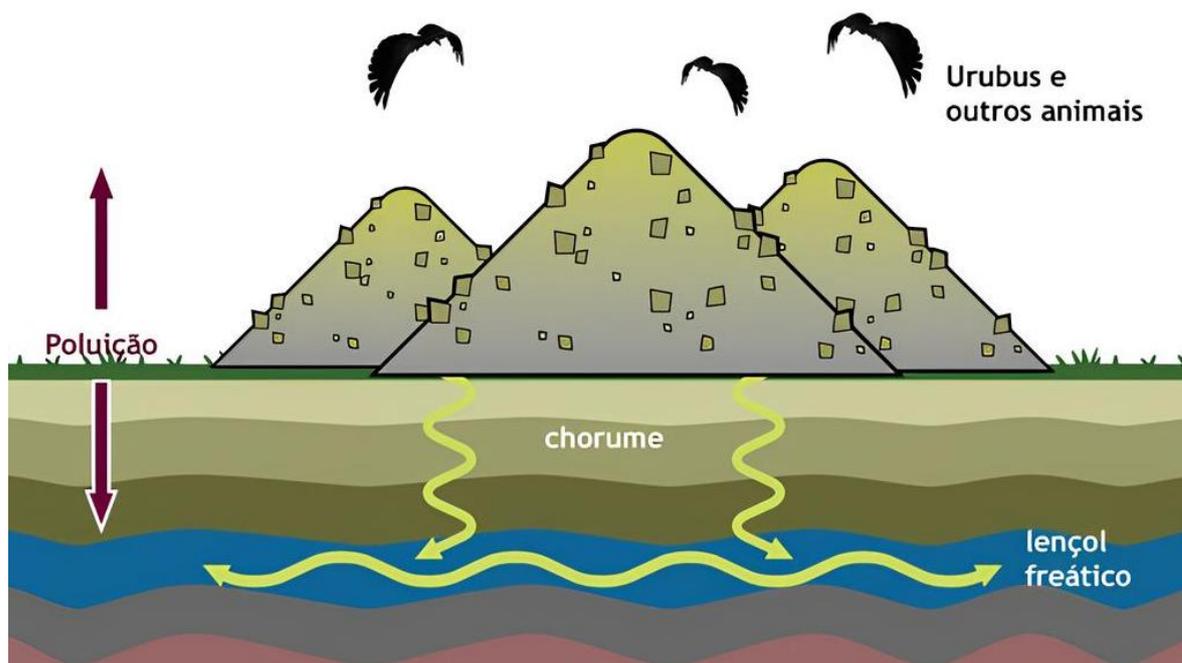
Fonte: Adaptado de BRASIL (2010).

Segundo Corrêa *et al.* (2019), os “lixões” são depósitos de resíduos em locais não licenciados, sem controle ambiental ou tratamento, onde há livre acesso de pessoas, que muitas vezes chegam a residir no local. A descarga irregular de lixo a céu aberto, sem medidas de proteção, causa desconforto e prejudica a saúde dos moradores devido ao mau cheiro e à proliferação de vetores, como moscas, roedores e baratas (MACHADO, 1996).

Entre os impactos ambientais causados pelos lixões estão a poluição visual, a alteração da qualidade do ar devido à liberação de gases tóxicos e mau cheiro, e a contaminação do solo, subsolo e das águas pelo chorume, líquido escuro resultante da decomposição da matéria orgânica (BAHIA, 2007). Esse líquido pode conter metais pesados e outros poluentes, além de atrair vetores de doenças como ratos, moscas, mosquitos e baratas (BAHIA, 2007).

O funcionamento e impacto gerado por esse tipo de sistema está ilustrado na Figura.

**Figura 1:** Impactos da disposição de resíduos em lixões a céu aberto



Fonte: Dias; Figueira Neto; Martins (2021).

O descarte de resíduos sólidos em lixões a céu aberto é a forma mais danosa de lidar com o “lixo” tanto para o ser humano quanto para o meio ambiente, mas infelizmente ainda é a mais comumente encontrada no Brasil (SILVA, 2020).

O Aterro Controlado é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos que minimiza impactos ambientais e riscos à saúde, concentrando o lixo em uma área menor e utilizando cobertura diária de solo, mas não possui impermeabilização de base, podendo

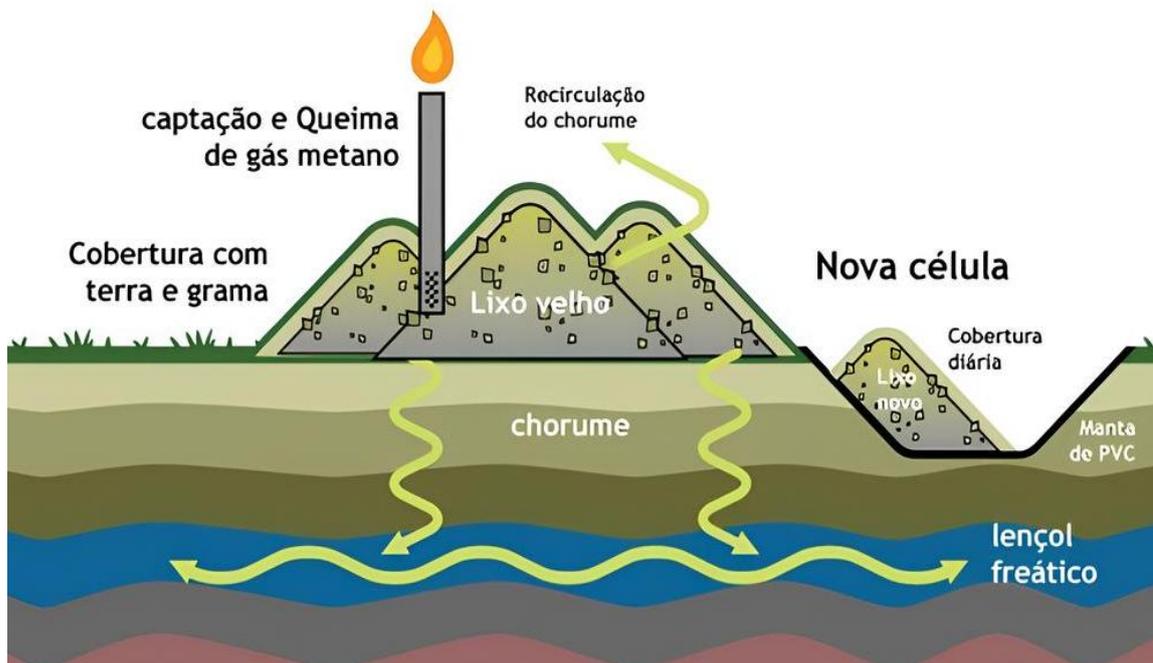
contaminar a água subterrânea por lixiviados (BENDA, 2008)

Esse método consiste em confinar e compactar o lixo, cobrindo-o com terra para reduzir a área de disposição, prolongar a vida útil do aterro, minimizar odores, evitar incêndios e impedir a proliferação de vetores nocivos (OLHER; OLHER; OLIVEIRA, 2012). Esse método utiliza os mesmos princípios de engenharia dos aterros sanitários, cobrindo os resíduos sólidos dispostos com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (FRANÇA, 2021) conforme ilustrado na Figura 2.

Esse método não é uma solução definitiva para a disposição de resíduos sólidos, pois apresenta alto potencial de impacto ambiental, especialmente na poluição da água e do solo quando não há impermeabilização (LANDIM; AZEVEDO, 2008). O aterro controlado é também conhecido pelo termo “lixão controlado”, onde é efetuada a disposição final dos resíduos sólidos, porém, sem a infra-estrutura própria de um aterro sanitário, mas com as condições mínimas para a compactação e cobertura diária dos resíduos (BENDA, 2008).

Os lixões e aterros controlados estão sendo combatidos por políticas públicas há décadas (o descarte irregular é proibido desde 1954 e foi aprovada a lei para o fim de áreas de condensação de lixos e agentes poluidores até 2014), no entanto, boa parte dos municípios não tem trabalhado com o problema da maneira adequada (CORRÊA *et. al*, 2019).

**Figura 2:** Esquema básico de um aterro controlado.



Fonte: Dias; Figueira Neto; Martins (2021).

Já o aterro sanitário é uma das formas consideradas ambientalmente adequadas para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (FERNANDES, 2019). Essa técnica é amplamente utilizada devido à sua simplicidade, baixo custo e capacidade de absorver grandes quantidades de resíduos diariamente, quando comparado a outros métodos de tratamento (ENSINAS, 2003).

Os aterros sanitários adotam processos como a impermeabilização do solo, compactação e cobertura diária das células de lixo, além da coleta e tratamento de gases e líquidos residuais, para minimizar os impactos negativos da disposição final do lixo (VELOZO, 2006). Para reduzir a área ocupada pelos resíduos, o aterro utiliza métodos de engenharia, impermeabilizando o solo com geomembrana de polietileno de alta densidade para prevenir a contaminação, compactando os resíduos para diminuir seu volume e cobrindo-os com camadas de terra (MONTAGNA, 2013), conforme ilustra a Figura 3.

Nos aterros sanitários, ocorre a digestão anaeróbia dos resíduos, onde microrganismos convertem a matéria orgânica em biogás, composto por metano ( $\text{CH}_4$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ) (FERNANDES *et al.*, 2022).

Em termos sociais, os aterros apresentam benefícios como a criação de empregos, a coleta seletiva de recicláveis e a inexistência de problemas com a comunidade local (FERNANDES, 2019). Além disso, a substituição dos lixões a céu aberto por aterros sanitários é uma medida essencial para a proteção ambiental, contribuindo para o possível aproveitamento energético do biogás (DALLEPIANE; RODRIGUES, 2018).

**Figura 3:** Esquema básico de um aterro sanitário.



Fonte: Dias; Figueira Neto; Martins (2021).

### **3.2 A Importância dos RSUs na Geração de Energia**

A conversão de resíduos sólidos urbanos em energia é vista, como uma opção ambientalmente favorável, pois gera energia elétrica de forma limpa, confiável e renovável, com menor impacto ambiental que outras fontes energéticas (MARANHO, 2008). Esse processo é utilizado há mais de 25 anos na Europa e América do Norte, sendo uma das formas mais "limpas" de geração de energia elétrica (MARANHO, 2008).

É importante destacar que o aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários se diferencia das usinas de incineração de RSU, as quais são bastante comuns em países desenvolvidos. Enquanto a incineração utiliza a queima direta dos resíduos para geração de energia, o aproveitamento do biogás ocorre a partir da captação e utilização dos gases produzidos pela decomposição anaeróbia dos resíduos dispostos no aterro (OLIVO; RIZK, 2021).

Regiões que possuem usinas de conversão de resíduos em energia apresentam índices de reciclagem acima da média nacional, devido à gestão integrada e à participação da comunidade no processo (MARANHO, 2008). As empresas responsáveis por essas usinas mantêm programas de educação ambiental, promovendo o correto aproveitamento dos resíduos e incentivando o engajamento da população local (MARANHO, 2008).

O tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) com recuperação energética é positivo, pois oferece uma fonte alternativa de energia local e ajuda a resolver o problema da disposição final dos resíduos (FREITAS, 2021).

### **3.3 Fontes de Energia Renováveis**

A crescente preocupação com a preservação ambiental e a busca pela diversificação da matriz energética, juntamente com o aumento da demanda por energia e o avanço da indústria, tem impulsionado o uso de fontes renováveis, como a solar (NASCIMENTO, 2017). As energias renováveis, como solar, hídrica, eólica e biomassa, são consideradas inesgotáveis, pois provêm de recursos naturais (GEHRKE; GORETTI; AVILA, 2021).

Embora as energias renováveis inicialmente envolvam custos mais altos, com o tempo elas se tornam mais competitivas devido à redução dos custos com a ampliação da produção e inovações tecnológicas (NASCIMENTO, 2017).

No Brasil, programas como ProGD (Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica) incentivam o uso de energias renováveis, com foco na redução de emissões de gases poluentes e no fortalecimento do setor elétrico (GEHRKE; GORETTI;

AVILA, 2021).

Estudos indicam que, até 2050, as fontes renováveis poderão ser responsáveis por 88% da eletricidade no Brasil, com destaque para a biomassa, eólica e solar (SILVA; TESHIMA, 2018).

### **3.4 Biodigestão Anaeróbia: Geração de Biogás, Purificação e Uso**

A decomposição da matéria orgânica em um ambiente anaeróbico (sem oxigênio) gera uma mistura gasosa conhecida como biogás (FNR, 2010), processo também conhecido como biodigestão anaeróbia. O biogás é originado principalmente de biomassa, como resíduos urbanos e agropecuários, incluindo vinhaça, palha de cana, bagaço, caroço de algodão e dejetos animais (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021). Seu uso reduz a emissão de metano e dióxido de carbono, ambos gases de efeito estufa (DANTAS; CHAVES; PIRES, 2021).

A composição do biogás geralmente é: 60% CH<sub>4</sub> (metano), 35% CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e os outros 5% incluem gases como H<sub>2</sub>S, nitrogênio, amônia, monóxido de carbono, oxigênio, entre outros (MATIAS, 2022).

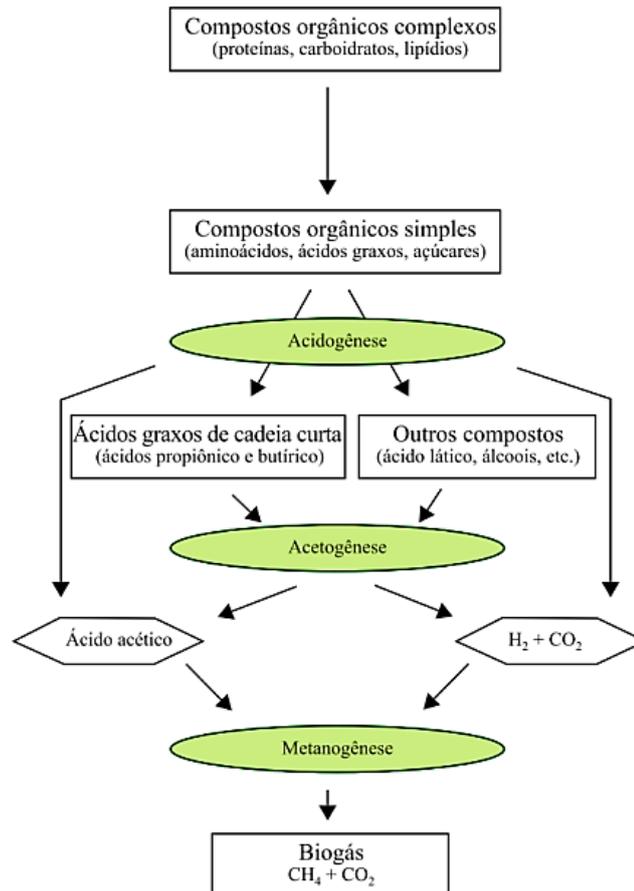
A composição do biogás também depende das condições socioeconômicas, culturais e históricas do município. Assim, a produção e os componentes do biogás variam conforme o tipo de material a ser decomposto e o andamento da atividade energética (DANTAS; CHAVES; PIRES, 2021). A técnica de biodigestão anaeróbia, especialmente para tratar resíduos com alto impacto ambiental, se destaca pela geração de biogás com alto valor energético (ARAÚJO, 2017).

A biodigestão anaeróbia visa, principalmente, transformar resíduos orgânicos em dois produtos com valor econômico: o biogás e o biofertilizante, também conhecido como digestato (ARAÚJO, 2017). Segundo Lopes (2016), a decomposição da matéria orgânica ocorre naturalmente por meio de microrganismos, que podem ser aeróbicos, anaeróbicos ou facultativos. O biogás gerado nesse processo é composto por metano e dióxido de carbono, podendo ser utilizado como combustível para aquecimento ou para a produção de eletricidade (EPA, 2012).

O processo de formação do biogás ocorre em três etapas: fermentação, acetogênese e metanogênese. Na primeira fase, a matéria orgânica é decomposta em compostos menores e solúveis (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021). Em seguida, esses compostos são convertidos em ácidos acéticos, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, na última etapa, ocorre a produção de metano, principal componente energético do biogás (MILANEZ; MAIA;

GUIMARÃES, 2021). Esse processo é ilustrado na Figura 4, que apresenta um esquema simplificado da decomposição anaeróbia.

**Figura 4:** Esquema da decomposição anaeróbia.



Fonte: Fnr (2010).

Já a purificação do biogás, segundo Karlsson *et. al* (2014), consiste na remoção de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), realizada por meio de lavagem com água pressurizada, que permite a dissolução desses gases.

Esses componentes indesejáveis comprometem a qualidade do biogás: o H<sub>2</sub>S é corrosivo, afetando tubulações, motores e equipamentos, além de ser tóxico à saúde humana; o CO<sub>2</sub>, por sua vez, reduz o poder calorífico do gás, limitando sua eficiência energética (FLECK *et al.*, 2018).

Apesar desses desafios, o biogás é amplamente utilizado na geração de calor em caldeiras e sistemas de aquecimento, sendo uma das formas mais tradicionais de aproveitamento dessa fonte renovável. Para viabilizar seu uso, são adotadas estratégias como o

uso de materiais resistentes, instalação de purgadores e linhas de condensação (MILANEZ; MAIA; GUIMARÃES, 2021).

### 3.4.1 Utilização do biogás

O biogás representa apenas 0,0817% da matriz energética brasileira, e considerando o não aproveitamento dessa fonte, 115 mil GWh deixam de ser gerados (SILVA, 2021). Em 2016, 25% da energia consumida no Brasil poderia ser proveniente do biogás, se fossem utilizados rejeitos urbanos, agropecuários e outros (SILVA, 2021). As diferentes formas de aproveitamento do biogás estão descritas no Quadro 2, que apresenta suas principais aplicações em setores como geração de energia, indústria e transporte.

**Quadro 2:** Diferentes utilizações para o biogás.

UTILIZAÇÃO COMO FONTE DE CALOR	Constitui-se como o uso mais simples do biogás, podendo ser utilizado principalmente em granjas de animais. Em aviários o biogás pode ser utilizado para o aquecimento dos pintinhos, através de equipamentos onde ocorre a queima do gás e consequente produção de calor.
PRODUÇÃO DE VAPOR	Indústrias de diferentes setores utilizam o biogás gerado pela biodigestão anaeróbia de seus resíduos orgânicos para a geração de vapor em caldeiras, economizando outras fontes de energia como, por exemplo, óleo combustível e lenha.
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	O biogás pode ser utilizado como fonte de energia primária para fornecer energia mecânica em motores, os quais acoplados a geradores elétricos são capazes de produzir energia elétrica.
MATÉRIA-PRIMA PARA A INDÚSTRIA	O metano pode ser utilizado como matéria-prima para a síntese de compostos orgânicos como, por exemplo, o metanol.
COMBUSTÍVEL VEICULAR	É uma alternativa atraente quando a produção de biogás é elevada, apresentando interesse crescente devido aos benefícios ambientais, em especial a ausência das emissões de monóxido de carbono e hidrogênio.

Fonte: Adaptado de FLECK *et. al*, 2018

### 3.4.2 Geração de biogás em aterros sanitários

A geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é prevista desde 2010, com a criação da Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa legislação reconhece a recuperação energética como forma adequada de destinação final, mas, mesmo com uma produção anual de cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos, essa alternativa ainda é pouco explorada no Brasil (SECIUK, 2022).

Apesar de o país ser responsável por 40% do lixo gerado na América Latina, a geração de energia a partir dos resíduos representa apenas 0,1% da capacidade instalada na matriz energética brasileira (GNPW, 2021; BARROS, 2021). Estimativas indicam que, se a produção de RSU se mantiver nos níveis atuais, seria possível gerar até 5.000 MW médios de eletricidade, o equivalente a uma nova Usina de Itaipu, considerando um rendimento energético de 30% (MARANHO, 2008). Com a adoção de processos de cogeração e o aproveitamento integral do calor, esse potencial poderia chegar a mais de 10.000 MW médios, com eficiência energética de até 88% (MARANHO, 2008).

O aproveitamento energético do biogás é uma estratégia promissora para ampliar a geração de bioenergia no Brasil. Segundo Passos (2019), essa fonte poderia representar até 18% da produção nacional de bioenergia, contribuindo não apenas para a geração elétrica e térmica, mas também para a destinação ambientalmente correta dos resíduos.

Em São Paulo, os aterros Bandeirantes e São João somam 45 MW de potência instalada, energia suficiente para abastecer cerca de 170 mil residências, enquanto Belo Horizonte conta com uma usina de 6 MW (GNPW, 2021). Na região Sul, o Paraná lidera a produção de biogás, com 16,4 milhões de m<sup>3</sup>/ano, seguido por Santa Catarina (12,8 milhões) e Rio Grande do Sul (3,3 milhões m<sup>3</sup>/ano) (GNPW, 2021).

Segundo Silva *et. al* (2013), diversas fontes alternativas de energia podem impulsionar sua produção, desde que o aterro possua características técnicas adequadas. Para ser viável energeticamente, um aterro precisa receber no mínimo 200 toneladas diárias de resíduos e possuir uma capacidade total superior a 500.000 toneladas (FREITAS; MAKIYA, 2012). O biogás produzido pode então ser convertido em eletricidade, vapor ou combustível (PIÑAS *et al.*, 2016).

O processo de geração de biogás inicia-se semanas após o depósito dos resíduos e pode continuar por até 15 anos após o encerramento das atividades do aterro (FREITAS; MAKIYA, 2012), mostrando que essa é uma solução duradoura com impacto positivo na matriz energética e no meio ambiente.

### **3.4.3 Sistema de operação, extração e tratamento do biogás do aterro**

O processo de operação, extração e tratamento do biogás em aterros sanitários envolve uma sequência interligada de procedimentos cujo objetivo é otimizar a captação, purificação e aproveitamento energético do gás gerado. Inicialmente, o biogás é extraído por meio de drenos horizontais e verticais, que o conduzem a pontos intermediários de fluxo conectados a uma

linha principal, mantendo uma vazão constante durante todo o processo (PASSOS, 2019; ICLE, 2009; TAVARES, 2019).

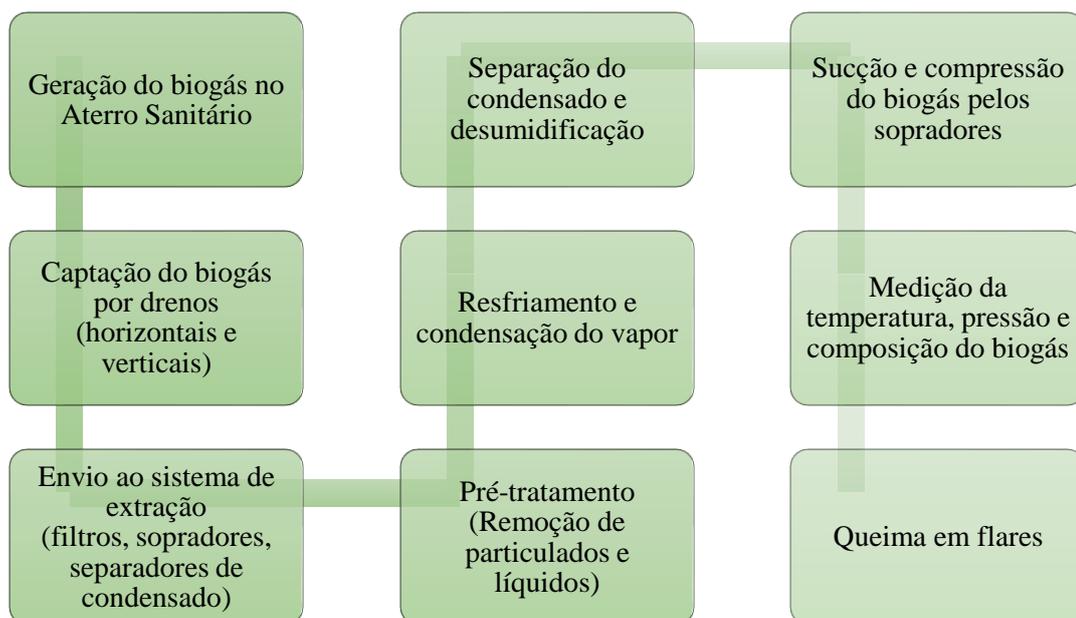
Durante essa extração, são utilizados sopradores para criar vácuo e filtros para a remoção de particulados, além de tanques separadores de condensado, que protegem os equipamentos e aumentam sua durabilidade (ICLE, 2009). O gás segue passa por um resfriamento utilizando trocadores de calor com solução de água e etileno-glicol, atingindo temperaturas próximas a 0°C, o que provoca a condensação do vapor e a separação de partículas líquidas e sólidas (TAVARES, 2018; SILVA, 2006).

A seguir, o gás passa por um tanque separador de líquidos (desumidificador), onde gotículas remanescentes são eliminadas por dispositivos chamados demisters (REZENDE, 2016; MONTAGNA, 2013). Após esse processo de purificação, o biogás é novamente comprimido por sopradores e sua composição é analisada, identificando o teor de metano, gás carbônico e oxigênio (BARRAK, 2018; ABLP, 2021).

Por fim, o biogás pode ser encaminhado para a queima controlada em flares — abertos ou enclausurados. Os flares abertos são mais simples e menos custosos, mas apresentam eficiência de até 98%, enquanto os enclausurados, recomendados para projetos com créditos de carbono, possuem eficiência superior a 99% (EPA, 2012; ICLE, 2009; MONTAGNA, 2013).

A seguir, apresenta-se um fluxograma que ilustra as principais etapas envolvidas na extração e no tratamento do biogás produzido em aterros sanitários.

**Fluxograma 1:** Fluxograma do processo de operação, extração e tratamento do biogás.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

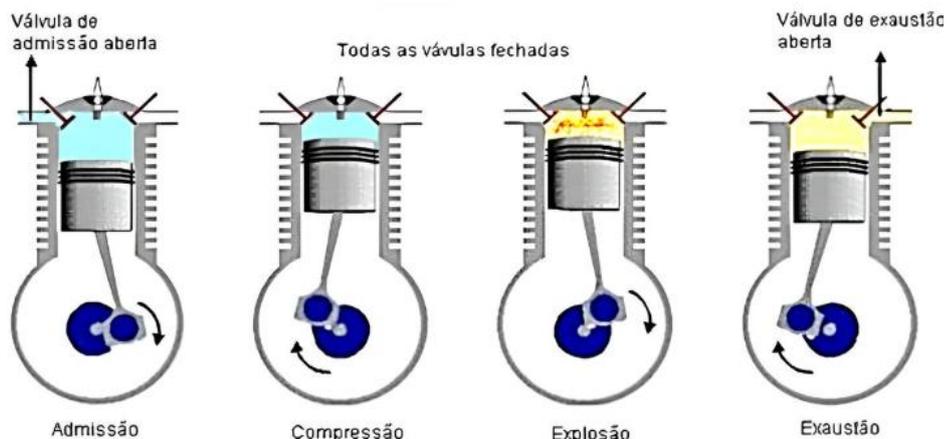
### 3.4.3.1 Tecnologias para geração de energia elétrica a partir do biogás

Para a geração de energia elétrica a partir do biogás, é comum o uso de três tecnologias: (i) motor de combustão interna – ciclo Otto; (ii) turbina a gás, e (iii) microturbinas.

O motor ciclo Otto é o equipamento mais utilizado para queimar biogás, devido á esta tecnologia apresentar maior rendimento elétrico e menor custo se comparado às demais tecnologias (BARRAK, 2018). Também conhecido como motor de combustão interna ou motor a explosão, o motor do ciclo Otto tem seu funcionamento baseado em quatro estágios (Figura 5) compreendendo as etapas de admissão, compressão, explosão e exaustão (ICLEI, 2009).

Seu baixo custo, fácil adaptação às características do gás e eficiência relativamente elevada, de 25 % a 35 %, os tornam a tecnologia de escolha em plantas de capacidade instalada entre 0,8 MW e 3 MW (EPA, 2010).

**Figura 5:** Etapas do funcionamento de um motor ciclo Otto.



Fonte: (ICLEI, 2009).

As turbinas a gás podem operar em ciclo aberto ou fechado. No ciclo aberto, o gás é comprimido, aumentando a pressão e a temperatura, e depois entra na câmara de combustão, onde ocorre a queima. O produto da combustão se expande na turbina, gerando energia mecânica (PASSOS, 2019).

No ciclo fechado, o gás gerado pela turbina é recirculado para o processo, passando por um trocador de calor onde é resfriado antes de voltar ao compressor. Essa diminuição da temperatura melhora a eficiência do sistema (PASSOS, 2019). Essa tecnologia é utilizada em grandes aterros de RSU, com mais de 5 milhões de toneladas de resíduos, e em projetos que geram mais de 5MW de eletricidade (ABRELPE, 2013).

As microturbinas são sistemas normalmente mais adequados para pequenas aplicações, com potência abaixo de 1MW, sendo projetados para fornecer eletricidade para o próprio local ou para usuários próximos (ABRELPE, 2013). Segundo Ensinas (2003), é possível usar grupos de equipamentos com potências variando de 30 a 100 kW, permitindo flexibilidade no aproveitamento do gás conforme a demanda local.

No quadro 3 abaixo são as principais vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas no quadro resumo.

**Quadro 3:** Vantagens, desvantagens, porte e custos das tecnologias utilizadas.

MOTORES	VANTAGENS	DESVANTAGENS	PORTE	CUSTOS
<b>Motores de Combustão Interna</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo unitário de capital</li> <li>• Confiabilidade</li> <li>• Menos requisitos para processar o combustível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maiores emissões de NO<sub>x</sub></li> <li>• Custos de manutenção mais elevados</li> </ul>	Aterros de porte moderado e grande	0,04-0,07 US\$ por kWh
<b>Turbinas A Gás</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissões menores de NO<sub>x</sub></li> <li>• Baixos custos de manutenção</li> <li>• Maior resistência à corrosão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnologia somente adequada à grande escala</li> <li>• Quantidade de energia necessária para comprimir o gás</li> </ul>	Aterros de grande porte	0,04-0,07 US\$ por kWh
<b>Micro Turbinas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modularidade</li> <li>• Mínima manutenção</li> <li>• Menor emissão de poluentes</li> <li>• Capacidade de queima de bio-gás com baixo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor eficiência</li> <li>• Mais sensível à contaminação por siloxanos</li> </ul>	Aterros de pequeno porte	0,07-0,14 US\$ por kWh

Fonte: Tavares (2019)

#### 3.4.4 Desafios na geração de energia a partir do biogás em aterros sanitários

A produção de energia elétrica a partir do biogás gerado em aterros sanitários tem sido apontada como uma alternativa promissora frente aos desafios da gestão de resíduos sólidos urbanos e da busca por fontes renováveis (FERNANDES *et al.*, 2022). No entanto, esse

processo envolve obstáculos que vão desde a variabilidade na composição do gás até barreiras técnicas e econômicas para sua conversão energética (FERNANDES *et al.*, 2022).

A formação do biogás ocorre por meio da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, sendo influenciada por fatores como composição química, umidade, temperatura, pH, idade do resíduo, tamanho das partículas e a própria operação do aterro (BARROS, 2013). Essa variabilidade afeta diretamente a concentração de metano (CH<sub>4</sub>), o principal componente energético do biogás, e conseqüentemente o poder calorífico do gás, o qual pode variar significativamente dependendo da fração orgânica dos resíduos e das condições ambientais (PECORA, 2006; BARROS, 2013).

Além disso, a presença de compostos indesejáveis como o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e siloxanos compromete a durabilidade dos equipamentos, sendo necessária a instalação de sistemas de purificação que aumentam o custo operacional (EICHLER *et al.*, 2024). O H<sub>2</sub>S é corrosivo e, em elevadas concentrações, exige que motores de combustão sejam adaptados ou protegidos, enquanto os siloxanos formam depósitos abrasivos nos cilindros e turbinas (SANTOS *et. al.*, 2024).

A complexidade da operação é outro ponto crítico. A taxa de produção de gás diminui com o tempo após o encerramento do aterro, tornando a viabilidade econômica sensível ao momento de implantação do sistema de geração (FERNANDES *et al.*, 2022). Modelos como o LandGEM - Landfill Gas Emissions Model, são comumente utilizados para prever a produção de metano, baseando-se em variáveis como precipitação e composição dos resíduos (BARROS, 2013).

Do ponto de vista econômico, estudos indicam que o custo da energia gerada por biogás pode ultrapassar R\$ 400/MWh, valor superior à tarifa média de comercialização no mercado brasileiro, tornando indispensável o apoio de políticas públicas e incentivos específicos para viabilização (FERNANDES *et al.*, 2022; TAVARES *et al.*, 2019).

Cabe ressaltar também que o acúmulo excessivo de umidade pode acelerar ou inibir o processo metanogênico, afetando o rendimento e a segurança da operação (BARROS, 2013; LIMA, 2005). A recirculação de chorume e o controle de infiltração de água de chuva são estratégias importantes para manter as condições ideais de produção de biogás (BORBA, 2006).

### **3.5 Energia Fotovoltaica**

O Sol é a maior fonte de energia existente, sendo a mais sustentável para a conversão em energia térmica. É a principal fonte de energia renovável, uma vez que as demais formas dependem da radiação solar, como a eólica, a geotérmica e a hídrica (NASCIMENTO, 2017).

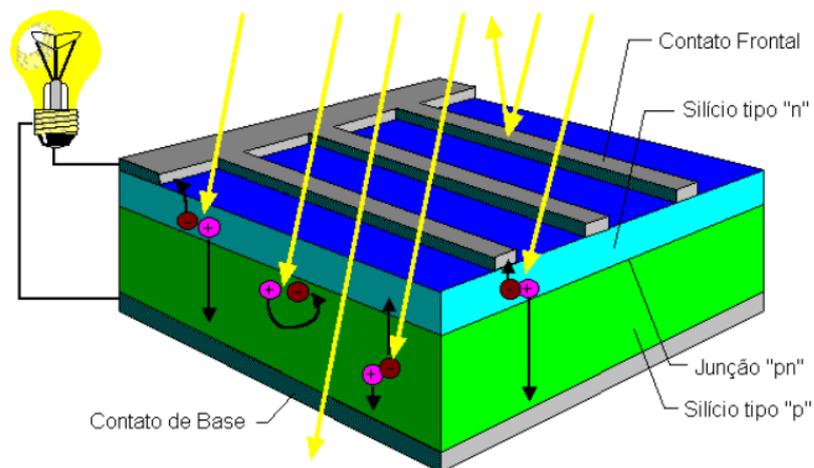
Apesar da elevada incidência solar no Brasil, o uso dessa fonte para geração de eletricidade ainda é limitado, com a energia solar representando apenas 0,05% da capacidade de geração instalada, enquanto outras fontes, como a eólica e a biomassa, contribuem com 6,7% e 9,4%, respectivamente (NASCIMENTO, 2017).

Segundo Kemerich et al. (2016), o estado de Santa Catarina tem a menor radiação solar global no Brasil, que ainda assim é quatro vezes maior do que a da Alemanha, líder mundial no uso da energia solar. Portanto, é necessário maior investimento e apoio governamental para a expansão do uso dessa tecnologia (KEMERICH *et al.*, 2016).

A energia solar fotovoltaica utiliza uma fonte livre de combustíveis fósseis e não emite gases de efeito estufa (RAHMAN; ALAM; AHSAN, 2019). De acordo com Braga (2008), essa tecnologia permite que as células solares convertam diretamente a radiação solar em eletricidade, diferentemente da energia solar térmica. As células fotovoltaicas, compostas por materiais semicondutores, absorvem a luz solar e liberam elétrons, gerando eletricidade (DECKER; SOUZA, 2019). A estrutura de funcionamento de uma célula fotovoltaica pode ser observada na Figura 6, que apresenta um corte transversal desse dispositivo.

O Brasil se destaca por suas características naturais favoráveis ao uso dessa tecnologia, com níveis de insolação de até 2.400 kWh/m<sup>2</sup>/ano (RODRIGUES, 2019).

**Figura 6:** Corte transversal de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Cresesb (2006)

### 3.5.1 Os principais tipos de células fotovoltaicas existentes

Para a geração de energia elétrica a partir da radiação solar, destacam-se duas tecnologias principais de células fotovoltaicas: (i) os módulos de silício cristalino (c-Si), que

são produzidos a partir de lâminas (wafers) de silício semicondutor; e (ii) os módulos de filme fino.

Os módulos de silício cristalino (c-Si) dominam mais de 90% do mercado fotovoltaico global e apresentam uma degradação de desempenho abaixo de 1% por ano devido à exposição prolongada (JORDAN; KURTZ, 2013). Esses módulos possuem garantias de produção de energia de 25 a 30 anos, embora possam continuar operando além desse período (EPA, 2022).

As células solares de silício se dividem em tecnologias monocristalinas, feitas de um único cristal de silício, e policristalinas, que utilizam múltiplos cristais de silício (EPA, 2022).

Os painéis solares de silício monocristalino são os mais eficientes, com rendimento entre 15% e 20% na conversão da luz solar em eletricidade (UCZAI, 2012). Já os painéis de silício multicristalino possuem rendimento médio de 14%, porém se destacam por apresentarem custos de produção mais baixos (UCZAI, 2012).

De acordo com Tolmasquim (2016), existem células solares laminadas feitas de Arseneto de Gálio (GaAs), um semicondutor composto que tem desempenho superior ao do silício. Essas células de junção têm a maior eficiência registrada até agora, alcançando 28,8% em testes laboratoriais (MIT, 2015). No entanto, o custo mais alto das células de GaAs limita seu uso a aplicações específicas (TOLMASQUIM, 2016).

Os módulos de filme fino correspondem de 10% a 15% das vendas anuais de módulos fotovoltaicos e são fabricados com finas camadas de materiais semicondutores aplicadas sobre suportes como vidro, plástico ou aço inoxidável, permitindo a criação de módulos flexíveis (UCZAI, 2012).

As células fotovoltaicas de película fina utilizam camadas muito finas de materiais semicondutores, como silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) ou CIGS — cobre, índio, gálio e selênio (EPA, 2022). Por sua flexibilidade, essas células podem ser aplicadas em superfícies não convencionais, como coberturas solares sobre aterros sanitários, ampliando as possibilidades de uso (EPA, 2022).

Alguns módulos de filme fino são montados em construções rígidas e podem ser utilizados em sistemas de inclinação fixa ou, em alguns casos, com rastreamento (EPA, 2022).

Apesar de absorverem mais radiação solar com camadas mais finas, a eficiência desses módulos ainda é inferior aos de silício cristalino, pois não conseguem converter essa absorção em maior produção de energia (TOLMASQUIM, 2016).

### 3.5.2 Demais estruturas componentes do sistema fotovoltaico: inversores, baterias, microrrede, etc.

Os inversores atualmente disponíveis no mercado, além de converterem a corrente contínua em alternada, também controlam eletronicamente a tensão e a frequência da corrente alternada, além de detectar falhas na rede elétrica (UCZAI, 2012). A energia elétrica em corrente contínua (CC) pode ser oriunda, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014). Quando conectados à rede elétrica, a tensão de saída do inversor precisa ser sincronizada com a da rede (PINHO; GALDINO, 2014).

Os inversores podem ser classificados basicamente em três tipos: inversores centrais, string e microinversores, conforme descrito no Quadro 4, que apresenta suas principais características de aplicação em sistemas fotovoltaicos.

**Quadro 4:** Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos.

<b>INVERSORES FOTOVOLTAICOS</b>	
Inversores centrais	São inversores de grande porte, com potência da ordem de centenas de kW até MW, utilizados majoritariamente em usinas fotovoltaicas. Nele são conectados vários arranjos de módulos fotovoltaicos.
Inversores String (monofásicos ou trifásicos)	São os mais utilizados em instalações residenciais e comerciais, congregando um grupo de módulos em cada inversor de pequeno porte.
Microinversores	Os microinversores são inversores individuais, projetados para serem acoplados a cada módulo fotovoltaico de uma instalação. Ao trabalhar com esses dispositivos, a produção de cada módulo é maximizada. Como os microinversores não são submetidos a potências e temperaturas de operação tão elevadas como em inversores centrais, costumam também ter garantias mais longas (20- 25 anos)

Fonte: Adaptado de (TOLMASQUIM, 2016)

As baterias são dispositivos que armazenam e liberam eletricidade por meio de um processo eletroquímico, com dois terminais elétricos, cátodo e ânodo, separados por eletrólito e conectados a um circuito elétrico (SAMPSON, 2009).

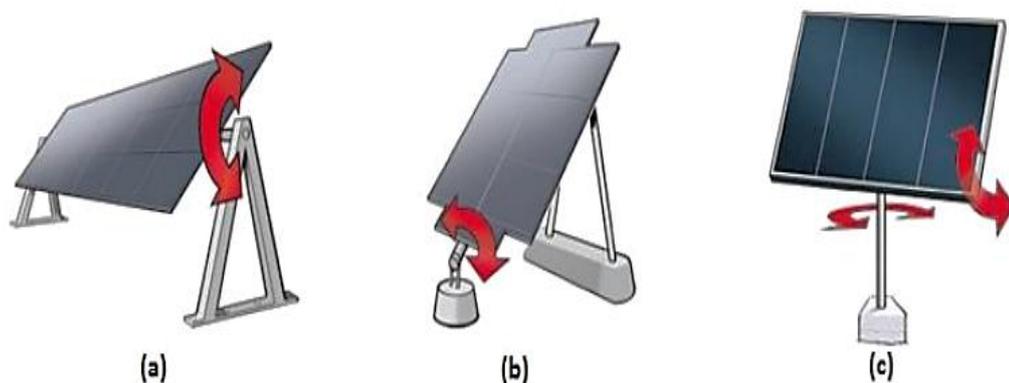
A corrente elétrica flui entre os terminais, dependendo de o processo ser de carga ou descarga. Existem diversos tipos de baterias, como as de chumbo-ácido, íon-lítio e de fluxo, cada uma com características próprias (SAMPSON, 2009).

As baterias de íons de lítio são as mais utilizadas em escala comercial e de serviços públicos por representarem mais de 80% da capacidade instalada no mercado devido à alta densidade de energia e à redução dos custos (EPA, 2022). Em sistemas com duração de 0,5 a 4 horas e vida útil de 15 anos, os custos variam entre US\$ 380 e US\$ 495 por kWh e a eficiência energética de ida e volta desses sistemas é de aproximadamente 86% (EPA, 2022)

As estruturas de montagem de inclinação fixa posicionam os painéis em um ângulo constante, otimizado de acordo com a latitude do local, para maximizar a captação de radiação solar ao longo do ano (SAMPSON, 2009).

Já os sistemas de rastreamento solar, que podem ter um ou dois eixos, permitem que os painéis sigam o movimento do Sol, sendo mais comuns em grandes centrais fotovoltaicas (TOLMASQUIM, 2016).

Rastreadores de eixo único são montados horizontalmente ao solo e permitem a rotação dos painéis para aumentar a exposição à luz solar ao longo do dia (SAMPSON, 2009). Já os rastreadores de eixo duplo acompanham tanto a altitude solar quanto o movimento de leste a oeste, ajustando os painéis conforme a posição do sol em qualquer hora ou estação (SAMPSON, 2009), como ilustrado na Figura 7.



**Figura 7:** Sistemas de seguimento solar de um (a, b) e dois (c) eixos.

Fonte: Tolmasquim (2016)

### 3.5.3 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

#### 3.5.3.1 Sistemas isolados (OFF-Grid)

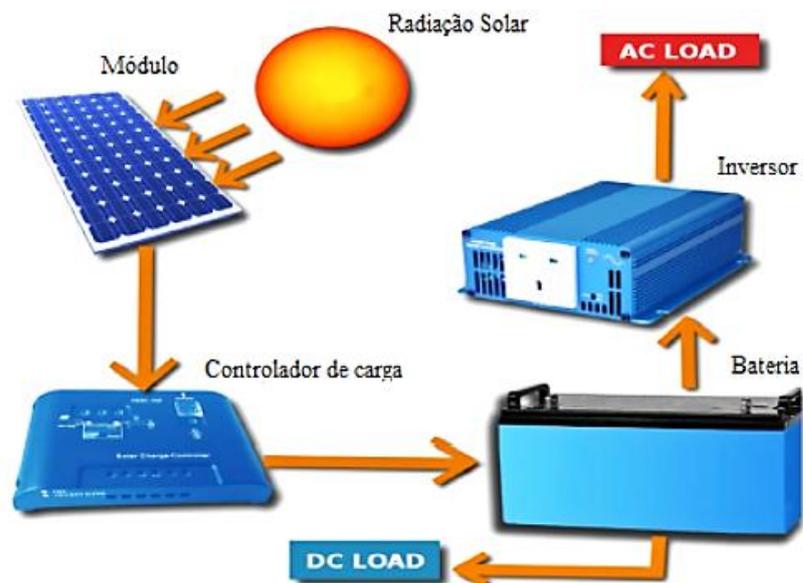
Os sistemas OFF-Grid, também chamados de sistemas isolados ou não conectados à rede elétrica, operam de forma independente (ALVES, 2019).

Para garantir o funcionamento de um sistema fotovoltaico isolado, é necessário o uso de elementos como placas solares, controladores de carga, inversores e baterias, que atuam no armazenamento e distribuição da energia gerada (RIBEIRO, 2020). Dependendo da aplicação, o sistema pode exigir controladores de carga e inversores CC/CA para garantir a autonomia energética (BORTOLOTO *et al.*, 2017).

Placas solares, controladores de carga, inversores e baterias são os elementos que compõem o ciclo de geração de energia fotovoltaica em um sistema isolado (RIBEIRO, 2020).

A Figura 8, apresenta o diagrama de funcionamento desse sistema.

**Figura 8:** Layout de um sistema off-grid.



Fonte: Ghafoor; Munir (2015)

### 3.5.3.2 Sistemas interligados à rede (ON-Grid)

O sistema é composto por módulos fotovoltaicos que convertem a energia solar em corrente contínua e inversores que a transformam em corrente alternada, compatível com os padrões da rede elétrica (BORTOLOTO *et al.*, 2017).

Países desenvolvidos têm impulsionado o crescimento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e há grande potencial para sua aplicação em áreas urbanas ensolaradas ao redor do mundo (ALVES, 2019). Esses sistemas são especialmente eficazes em horários de

pico de demanda durante o dia e quando a demanda é maior no verão aumenta a chance de coincidência com a disponibilidade de energia solar (ALVES, 2019)

É também o sistema com o melhor custo benefício, a qual o retorno do investimento é feito de forma mais rápida (BABIO, 2018).

### 3.5.3.3 Sistemas fotovoltaicos híbridos

Desconectados ou não da rede elétrica convencional, sua extração de energia é devido ao uso de várias fontes (FADIGAS, 2012). Em outras palavras, são sistemas que, estando isolados da rede elétrica, existe mais de uma forma de geração de energia, como por exemplo, gerador diesel, turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos (BABIO, 2018).

## 3.6 Sistemas Fotovoltaicos em Aterros Desativados

O encerramento de um aterro sanitário geralmente marca o fim da disposição de resíduos, sendo a área então coberta com solo, vegetação e sistemas de drenagem (CURITIBA, 2009). Contudo, um aterro só é considerado oficialmente encerrado quando estiver estabilizado tanto do ponto de vista bioquímico quanto geotécnico, e sua área tiver sido recuperada e considerada apta para uma nova ocupação ou uso (CURITIBA, 2009).

Nos últimos anos, sistemas fotovoltaicos têm sido amplamente aplicados em aterros desativados, com casos bem-sucedidos já testados e implementados em diversos países (TANSEL, 2011). Segundo Szabó *et al.*, (2017), aterros desativados costumam manter a conexão com a rede elétrica usada durante sua operação, muitas vezes com capacidade significativa, especialmente quando havia geração de eletricidade a partir do gás de aterro (LFG). Com a redução do LFG após o encerramento do aterro, essa conexão torna-se subutilizada. Aproveitar essa infraestrutura existente é, portanto, uma estratégia vantajosa para instalar sistemas fotovoltaicos, principalmente quando há capacidade de escoamento da energia gerada (SZABÓ *et al.*, 2017).

A energia gerada por essas usinas pode ser utilizada no próprio local ou comercializada externamente (SAMPSON, 2009). Gu *et al.* (2022) ressaltam que esse tipo de instalação é vantajoso por ocupar terrenos sem outra finalidade e contribuir para a preservação de áreas ambientalmente mais valiosas. No entanto, diferentemente das instalações solares convencionais, a implantação de sistemas fotovoltaicos em aterros exige um processo mais complexo de licenciamento, construção e manutenção (MILLARD, 2022).

A identificação de locais viáveis para sistemas fotovoltaicos em aterros desativados passa por etapas que vão da triagem inicial à análise financeira, conforme mostra o Quadro 5.

**Quadro 5:** As fases para a detecção de um possível local.

<b>PRÉ-TRIAGEM</b>	Requer interesse do proprietário, tipo de sistema, custos e demanda de energia, além do estado de contaminação e operação do local. Normalmente envolve coleta de dados por operadores e uso de ferramentas especializadas
<b>TRIAGEM DO LOCAL</b>	A avaliação depende do interesse do proprietário, tipo de sistema, custos e demanda de energia, além do estado de contaminação e operação do local. Requer coleta de dados por responsáveis e uso de ferramentas especializadas.
<b>TRIAGEM FINANCEIRA</b>	Considerações políticas e regulamentos, situação dos incentivos, custo de instalação. As informações podem ser obtidas por uma análise de mercado sobre os custos de construção da usina.

Fonte: Adaptado de Sangiorgio; Falconi (2015).

Em comparação com os projetos fotovoltaicos tradicionais, os projetos de aterros solares apresentam várias vantagens, o que torna os aterros solares uma boa solução para a questão do uso do solo após o encerramento da operação dos aterros (GU *et al.*, 2022).

### 3.6.1 Sistemas de montagem e tecnologias solares em aterros sanitários

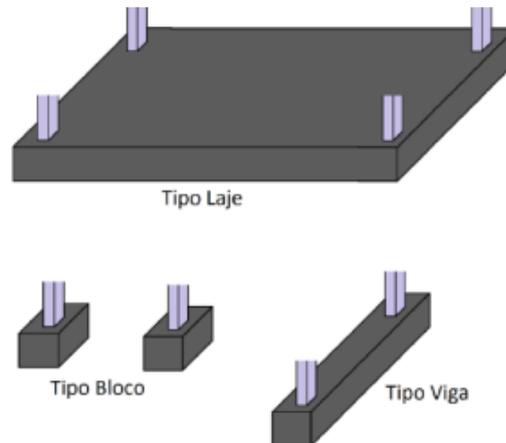
Os sistemas fotovoltaicos têm características específicas que são importantes para instalações em tampas de aterros sanitários, como as classificações de energia e as propriedades de peso dos componentes (SAMPSON, 2009).

O material utilizado para cobrir os aterros, normalmente terra, é retirado da própria área do aterro durante a escavação, visando reduzir custos e viabilizar o uso (SILVA, 2020). No entanto, as deformações da camada superior, causadas pelas reduções de volume, afetam a estabilidade das estruturas, impactando tanto a eficiência da geração de eletricidade quanto a integridade dos módulos fotovoltaicos (SANGIORGIO; FALCONI, 2015).

Por ser impossível penetrar na tampa do aterro, é necessário usar sistemas fotovoltaicos de lastro, que não perfuram o solo, como os de ancoragem por pilares ou suportes de concreto (SALASOVICH; MOSEY, 2011).

Segundo a EPA (2022), os projetos de sistemas de montagem em aterros levam em consideração essas condições e devem ser projetados para suportar o assentamento do solo, utilizando fundações comuns como laje, bloco e viga, conforme ilustrado na Figura 9.

**Figura 9:** Principais tipos de fundações utilizadas para sistemas fotovoltaicos em aterro.



Fonte: Pinho; Galdino (2014)

A análise da inclinação e estabilidade do aterro é fundamental para avaliar a viabilidade de um sistema fotovoltaico, pois influencia a escolha dos componentes, o design do sistema e o potencial de produção de energia (EPA, 2022).

Para realizar essa avaliação, informações como mapas topográficos, levantamentos do local e estudos de engenharia de solos, frequentemente presentes no plano pós-fechamento do aterro, são necessárias (KIATREUNGWATTANA *et al.*, 2013).

Quando o terreno apresenta declividade superior a 5 graus, a instalação dos sistemas fotovoltaicos se torna mais desafiadora devido aos efeitos de sombras e à necessidade de soluções mais complexas para controle de erosão e águas pluviais (SAMPSON, 2009).

O topo do aterro, conhecido como top deck, é frequentemente a área mais indicada para instalação de sistemas fotovoltaicos devido à sua inclinação suave e uniforme entre 2% e 3% (EPA, 2022). Essas inclinações são projetadas para escoar a água da chuva, evitar erosão e infiltração e quando orientadas para o sul favorecem a captação ideal da luz solar (EPA, 2022).

Taludes de aterros voltados para o norte geográfico, no hemisfério sul, ou para o sul geográfico, no hemisfério norte, são ideais para maximizar a exposição ao sol, especialmente em altitudes mais elevadas, levando em conta o sombreamento (SAMPSON, 2009).

Muitos aterros possuem encostas íngremes com inclinações superiores a 30% e esse formato pode dificultar a instalação de sistemas fotovoltaicos no local (KIATREUNGWATTANA *et al.*, 2013). Desenvolvedores solares geralmente consideram viável apenas áreas com inclinação entre 5% e 10% pois quanto maior o grau do terreno maior é a complexidade do projeto e o custo da instalação (KIATREUNGWATTANA *et al.*, 2013).

Como regra geral, declives mais acentuados requerem conjuntos solares mais leves e fundações mais fortes (SAMPSON, 2009).

### 3.6.2 Desafios da instalação de sistemas fotovoltaicos em aterros

A viabilidade técnica da captação de energia solar em aterros depende da compatibilidade dos sistemas fotovoltaicos com os componentes já existentes no local (TANSEL, 2011). Entre esses fatores estão o status de fechamento, a inclinação e a estabilidade do aterro, o potencial de assentamento, as características da tampa, a cobertura vegetal e outros sistemas como os de gestão de lixiviado, gás de aterro e águas pluviais (EPA, 2022).

O lixiviado é formado quando a água percola pelos resíduos e se acumula na base do aterro, sendo coletado por meio de sistemas com camadas de drenagem e redes de tubos que conduzem o líquido até unidades de tratamento (EPA, 2005). Já o gás de aterro, gerado por reações químicas e biológicas nos resíduos, é captado por poços ou valas e pode ser direcionado para queima ou aproveitamento energético, conforme o projeto (EPA, 2005).

De acordo com a USEPA (2013), o gás de aterro é explosivo, e a instalação de sistemas fotovoltaicos muito próximos aos equipamentos de captação pode representar risco de faíscas e, conseqüentemente, de explosões. Por isso, é fundamental que estruturas fechadas e condutos usados para a gestão do gás sejam projetados de forma a evitar acúmulo ou transporte inadequado (USEPA, 2013).

A gestão de águas pluviais está diretamente relacionada ao controle da erosão e ao uso de coberturas vegetativas, que ajudam a absorver o escoamento superficial (USEPA, 2013). O excesso de água pode infiltrar no solo ou ser levado a lagoas de retenção, devendo-se respeitar a legislação ambiental, considerar a interação com sistemas solares e usar essa água para limpar os painéis, garantindo um uso eficiente dos recursos (USEPA, 2013).

As condições meteorológicas como precipitação, radiação solar, velocidade e direção do vento, e temperatura afetam o desempenho tanto dos sistemas fotovoltaicos quanto dos próprios aterros, de forma isolada e combinada (EPA, 2022).

Os sistemas solares também podem influenciar o funcionamento do aterro ao alterar o caminho do escoamento das águas pluviais e a exposição ao sol e ao vento, impactando a estabilidade da tampa e os sistemas de controle de erosão (KIATREUNGWATTANA *et al.*, 2013).

Dados de precipitação, como índices anuais e eventos extremos, são fundamentais para prever como os sistemas fotovoltaicos podem modificar o comportamento do aterro (EPA, 2022). Essas informações ajudam a identificar mudanças na permeabilidade do solo, no sistema de drenagem e no risco de erosão, além de avaliar a estabilidade dos taludes e o aumento do lixiviado no aterro (EPA, 2022).

Os principais desafios e possíveis soluções para a instalação de sistemas fotovoltaicos em aterros sanitários estão organizados no Quadro 6, a seguir:

**Quadro 6:** Desafios e soluções potenciais para instalação de painéis solares.

DESAFIO	IMPACTO	SOLUÇÃO POTENCIAL
<b>ENCOSTAS ÍNGREMES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Água da chuva;</li> <li>- Intensidade da erosão;</li> <li>- Cargas de vento forte;</li> <li>- Estabilidade da fundação para ancoragem de painéis solares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laminados PV flexíveis;</li> <li>- Outros sistemas solares leves com fundações seguras;</li> <li>- Uso de corretivos do solo.</li> </ul>
<b>SISTEMA DE TAMPA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altas necessidades de manutenção da tampa;</li> <li>- Necessidade de reclassificação para aumentar a espessura da cobertura fina;</li> <li>- Integridade do sistema de tampa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bases leves e não invasivas;</li> <li>- Plataformas solares com lastro e sapatas rasas.</li> </ul>
<b>ADENSAMENTO DE ATERRO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Superfície irregular;</li> <li>- Tensão estrutural em áreas de assentamento;</li> <li>- Infiltração e acúmulo de água;</li> <li>- Integridade da fundação, Integridade do sistema de gás, Integridade da tubulação de lixiviado, Integridade das utilidades subterrâneas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estruturas de montagem de inclinação fixa;</li> <li>- Bases e lastros leves e rasos;</li> <li>- Mitigação de pré-fechamento;</li> <li>- Reforço de geogrelha</li> <li>- Locais de colocação seletivos (ou seja, resíduos mais antigos, resíduos de construção e demolição).</li> </ul>
<b>VENTO FORTE E NEVE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conexões do sistema;</li> <li>- Estabilidade da fundação;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estruturas de montagem com altas classificações de carga mecânica;</li> <li>- Evitar inclinações laterais.</li> </ul>
<b>NECESSIDADES DE MANUTENÇÃO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pesquisas sobre a Liquidação;</li> <li>- Atividades de extração de gás;</li> <li>- Inspeções de erosão;</li> <li>- Gestão da vegetação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Colocação do painel solar em torno das cabeças dos poços de monitoramento;</li> <li>- Altura do painel para permitir necessidades de paisagismo de rotina;</li> <li>- Estradas de acesso permanentes existentes.</li> </ul>

### 3.7 Sistemas Híbrido (Biogás + Energia Solar)

A regulamentação energética no Brasil tem impulsionado o crescimento das energias renováveis, como o biogás e a solar fotovoltaica. A Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL facilitou a conexão de usinas de biogás e solar à rede elétrica, incentivando a geração distribuída (SILVA; OLIVEIRA; PEREIRA, 2019). Além disso, o programa RenovaBio e as normas da ANP para o biometano têm promovido o uso do biogás como fonte de energia limpa (UNIVATES, 2021).

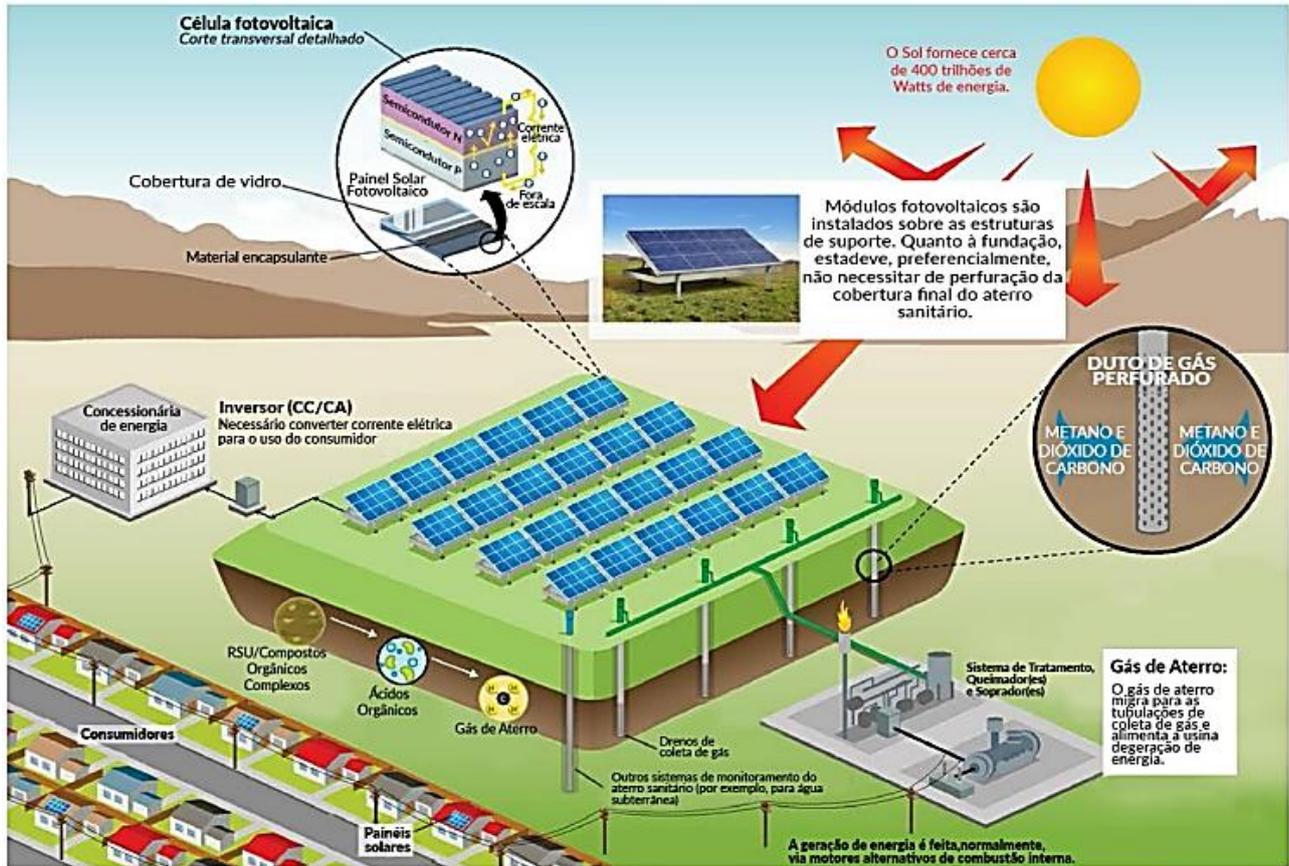
A integração de sistemas híbridos em aterros, que associa a conversão de biogás em eletricidade à energia solar fotovoltaica, permite uma geração energética mais estável e eficiente (CHAVES, 2020). Essa combinação compensa a intermitência da energia solar com a constância do biogás, otimizando o uso dos resíduos sólidos e gerando benefícios ambientais e econômicos (CHAVES, 2020). Além disso, embora a produção de biogás possa continuar por até 15 anos após o encerramento do aterro, sua vazão diminui com o tempo, o que pode comprometer a geração isolada de energia (FREITAS; MAKIYA, 2012). Assim, os sistemas híbridos surgem como alternativa sustentável para garantir a continuidade da produção energética (CHAVES, 2020).

Um exemplo conceitual dessa integração pode ser observado na Figura 10, que ilustra como os sistemas de energia solar fotovoltaica e biogás podem coexistir em um aterro sanitário.

Internacionalmente, países como Alemanha, Estados Unidos e Japão têm investido na integração de sistemas híbridos (biogás + energia solar) em aterros sanitários. Na Alemanha, essa combinação tem sido usada para otimizar a geração de energia renovável, aproveitando a infraestrutura dos aterros (MÜLLER *et al.*, 2017). Nos Estados Unidos, projetos em estados como Califórnia e Nova York estão avaliando a viabilidade econômica e ambiental desses sistemas (SMITH; JOHNSON, 2018). No Japão, a integração de biogás e solar faz parte de uma estratégia para aumentar a resiliência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (TANAKA *et al.*, 2019).

No Brasil, o uso de biogás e energia solar tem sido cada vez mais explorado, especialmente em aterros sanitários desativados, como uma maneira de promover a sustentabilidade e melhorar a eficiência energética dos sistemas de gestão de resíduos (COSTA; SILVA, 2020). De acordo com O'Rourke *et al.* (2020), essa integração também tem sido considerada uma forma eficaz de promover a transição para uma matriz energética mais sustentável e resiliente.

**Figura 10:** Exemplo de projeto conceitual de energia solar fotovoltaica e biogás em um aterro sanitário.



Fonte: Traduzido de Kiatreungwattana *et al.* (2013)

### 3.7.1 Desafios na implementação de sistemas híbridos

De acordo com Chaves (2020), a combinação de duas fontes de energia diferentes exige um planejamento técnico minucioso para assegurar que o sistema seja compatível e opere com eficiência. Além disso, a manutenção e os reparos de sistemas híbridos tendem a ser mais complexos do que os de sistemas convencionais, o que pode demandar treinamento especializado e o uso de equipamentos específicos (SINGH *et al.*, 2018).

A produção de biogás é variável e depende da composição dos resíduos e das condições ambientais do aterro enquanto a geração solar também sofre interferência das condições climáticas e da variação diária de luminosidade (MÜLLER *et al.*, 2017). Diante dessa intermitência é fundamental implantar sistemas de controle e estratégias de armazenamento de energia que permitam gerenciar com eficiência essas oscilações na geração elétrica (MÜLLER *et al.*, 2017).

A implementação desses sistemas pode ser desafiada por questões regulatórias e burocráticas, como a obtenção de licenças ambientais, o cumprimento de normas técnicas e as

negociações de contratos de venda de energia, processos que podem ser complicados e demorados (SMITH; JOHNSON, 2018).

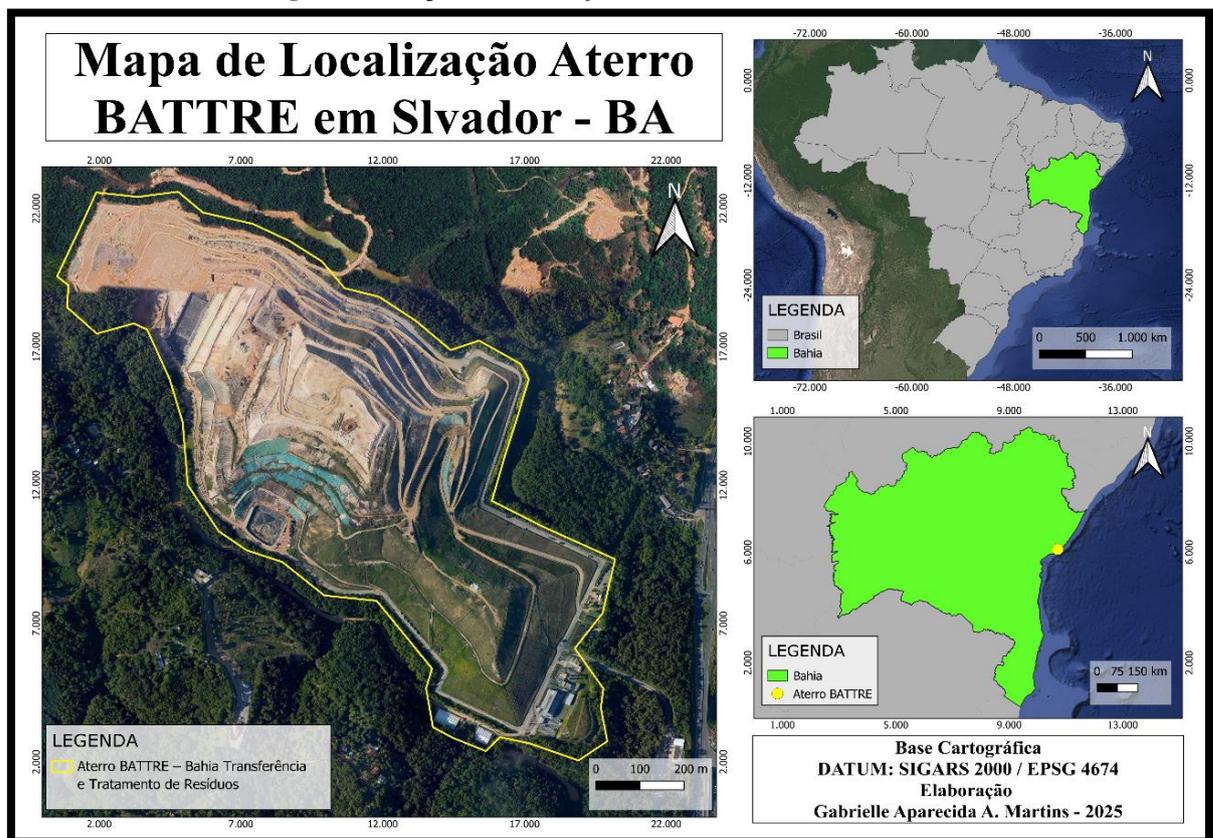
Além disso, a participação da comunidade é fundamental para garantir a aceitação e o sucesso do projeto (KUMAR *et al.*, 2017).

### 3.8 Casos de Geração de Energias Renováveis em Aterros Sanitários

#### 3.8.1 Biogás (Aterro Sanitário de Salvador – Bahia)

O aterro BATTRE – Bahia Transferência e Tratamento de Resíduos, no município de Salvador iniciou suas atividades em 1998, recebendo diariamente cerca de 3 mil toneladas de resíduo doméstico. Está localizado próximo às coordenadas 12°51'38.36"S e 38°22'7.78"O, na Rodovia BA 526 s/n° KM 6,5, Bairro São Cristóvão, município de Salvador - BA, em terreno com área total de 250 hectares. A Figura 11 apresenta um mapa detalhado de localização do aterro.

Figura 11: Mapa de Localização do Aterro Battre em Salvador.



Fonte: Mapa elaborado pela autora (2025)

Primeira termelétrica a biogás de aterro sanitário do Nordeste, a usina Termoverde Salvador é um investimento de R\$50 milhões do Grupo Solví (SOLVÍ, 2019). A usina entrou

em funcionamento no início de janeiro de 2011, transformando em energia limpa o biogás gerado pela decomposição RSU (SOLVÍ, 2019).

A termelétrica tem potência instalada de 19,73 MW/Garantia Física de 13,4 MW e capacidade de produzir 150 mil MWh ao ano, equivalente a energia suficiente para atender a 50 mil residências (200 mil pessoas) (DIÁRIO OFICIAL, 2021).

A produção de energia elétrica a partir de biogás em aterro já é capaz de suprir o consumo de aproximadamente 150 mil pessoas e tende a crescer com a continuidade do recebimento de resíduos no local (CORREIO, 2019). A empresa responsável é a maior geradora acumulada de energia elétrica com biogás de aterro sanitário do país, com mais de 10.000 MWh mensais fornecidos a grandes consumidores (CORREIO, 2019). Essa geração contribui para o aumento da oferta de energia limpa e para a diversificação da matriz energética brasileira, fortalecendo a sustentabilidade no setor (CORREIO, 2019).

A energia produzida do biogás de aterro pela Termoverde Salvador é comercializada para cinco clientes do Nordeste e Sudeste brasileiro, entre eles, uma operadora de telefonia, uma rede de supermercado e três shoppings centers (SOLVI, 2019). Constituindo-se a termelétrica no primeiro empreendimento do Nordeste e o terceiro do Brasil a utilizar esse tipo de combustível na geração de energia elétrica em escala comercial (DIÁRIO OFICIAL, 2021). A Figura 12 mostra a vista aérea da Termoverde e os módulos de geração de energia a partir do biogás do aterro.

**Figura 12:** (a) Vista aérea Termoverde (b) Módulos de geração de energia.

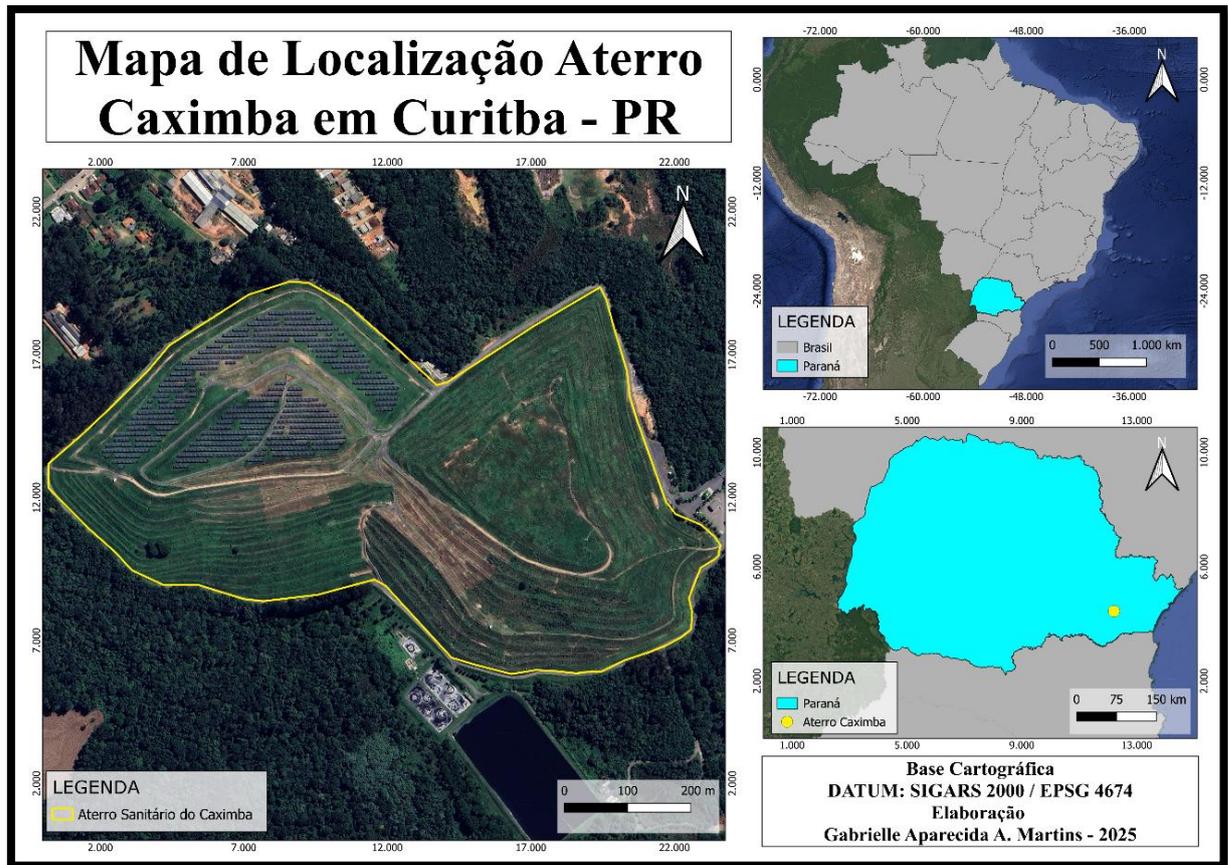


Fonte: Solví (2019)

### 3.8.2 Solar fotovoltaica (Aterro sanitário Caximba – Paraná)

O Aterro Sanitário da Caximba em Curitiba iniciou sua operação em 1989 e foi desativado em outubro de 2010. Está localizado próximo às coordenadas 25°37'10.16"S e 49°20'19.01"O, na região sul de Curitiba, em terreno com área total de 1.015 km<sup>2</sup> e a área para disposição de resíduos, de 439,54 km<sup>2</sup>. A Figura 13 apresenta um mapa detalhado de localização do aterro.

**Figura 13:** Mapa de Localização do Aterro Sanitário Caximba.



Fonte: Mapa elaborado pela autora (2025)

Durante seu período de operação o aterro do Caximba recebeu em média 2.400 toneladas de lixo por dia provenientes de Curitiba e região metropolitana acumulando mais de 12 milhões de toneladas ao final de sua vida útil (SILVA, 2021).

A Pirâmide Solar, inaugurada em 2023 em Curitiba, é um exemplo de aproveitamento de aterros sanitários para geração de energia limpa (PAINEL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2023). Com a instalação de 8.600 painéis solares e uma capacidade de 4,55 MWp, a usina já gerou 4.598.094 kWh, suficiente para abastecer 20 mil residências por um mês (PAINEL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2023).

O projeto, uma parceria entre a Prefeitura e a Copel, distribui a energia gerada para 269 prédios públicos e gera uma economia mensal de 30% nas contas de energia, totalizando R\$ 2,65 milhões ao ano, que poderão ser reinvestidos em benefícios para a população (TRIBUNA DO PARANÁ, 2021; ARCHDAILY, 2023).

A usina conta com 18 inversores para converter a energia gerada pelos painéis solares de corrente contínua para corrente alternada, que é utilizada na rede elétrica da Copel (PAINEL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2023).

Importante destacar que, durante a instalação da usina solar, houve preocupações com a segurança e integridade das estruturas existentes no antigo aterro (PREFEITURA DE CURITIBA, 2021). Por esse motivo, foi respeitada uma distância mínima de cinco metros entre os queimadores de biogás e os painéis solares, assegurando condições adequadas para ambas as tecnologias coexistirem de forma segura e eficiente (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2021).

Com um investimento de cerca de R\$ 31,5 milhões, a Pirâmide Solar representa uma solução inovadora, eficiente e sustentável, que pode inspirar outras cidades a adotarem modelos semelhantes de aproveitamento de espaços abandonados para gerar energia limpa (EKKO GREEN, 2022). Além disso, o projeto visa promover a educação ambiental e conscientização sobre a importância da sustentabilidade (SBRISSIA & ELMOR, 2024). A usina foi projetada para operar por 25 anos, com garantia de desempenho de 80% após esse período (PMC, 2021).

A Figura 14 ilustra a vista aérea da usina fotovoltaica no Caximba e o posicionamento das estruturas, destacando o distanciamento entre os queimadores de biogás e os painéis solares.

**Figura 14:** (a) Vista aérea da usina fotovoltaica. (b) Posicionamento das estruturas.

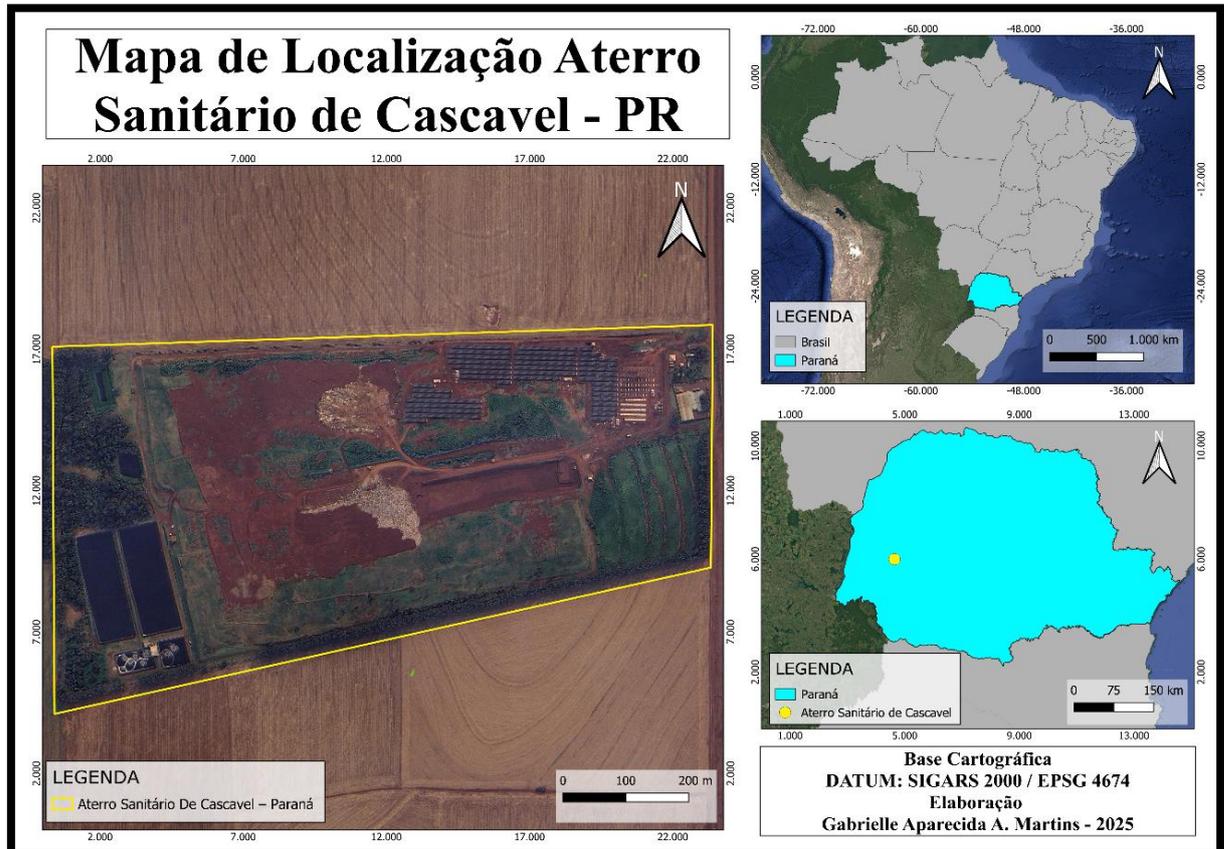


Fontes: Prefeitura de Curitiba (2024); Gazeta24horas (2024).

### 3.8.3 Sistema híbrido (Aterro Sanitário de Cascavel – Paraná)

O Aterro Sanitário de Cascavel em Cascavel iniciou sua operação em 1994 e está localizado próximo às coordenadas 24°51'5.23"S e 53°29'18.90"O, na região rural de Cascavel, em terreno com área total de 140 hectares e a área para disposição de resíduos, de 60 hectares. A Figura 15 apresenta um mapa detalhado de localização do aterro.

**Figura 15:** Vista aérea do Aterro de Cascavel no Paraná.



Fonte: Mapa elaborado pela autora (2025).

O aterro sanitário de Cascavel está localizado na zona rural do município, na localidade de Espigão Azul, está aproximadamente a 30 km da sede do município (SANTOS E TAUCHEN, 2010).

No aterro, 280 toneladas métricas de resíduos chegam diariamente, sendo despejadas pelos caminhões da região, onde são depositadas e posteriormente compactadas por tratores esteira e preparadas no aterro do aterro, podendo atingir mais de 20 metros de profundidade (SOUZA, 2020).

Cascavel foi o primeiro município do Paraná a gerar energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário por meio do regime de compensação com geração distribuída e uso de tecnologia totalmente nacional (PREFEITURA MUNICIPAL DE CASCAVEL, 2015). O

sistema utiliza de forma sustentável o biogás que antes era apenas queimado e destaca-se por permitir a geração de energia por até 20 anos dependendo da concentração de metano presente (PREFEITURA MUNICIPAL DE CASCAVEL, 2015).

Conforme apontado por Souza (2020), a tecnologia empregada no aterro envolve motogeradores adaptados para operar com biogás, destacando-se pela confiabilidade, eficiência e baixos custos de operação e manutenção.

A produção média de bioenergia no aterro sanitário de Cascavel varia entre 90 e 100 mil kWh, resultando em uma economia mensal de aproximadamente R\$ 60 mil a R\$ 65 mil para o município (ALEMDA ENERGIA, 2021). A energia gerada é direcionada para a rede elétrica e utilizada em escolas, creches, praças públicas e outros espaços, contribuindo para a economia de recursos públicos e, conseqüentemente, beneficiando os cidadãos que pagam impostos (SOUZA, 2020).

Além da produção de energia a partir do biogás, o aterro também possui uma usina solar com capacidade de 25 MW, que foi inaugurada após um investimento de R\$ 3 milhões pela Itaipu Binacional (PV MAGAZINE BRASIL, 2024). A usina solar abastece a frota de ônibus elétricos da cidade, fazendo de Cascavel a primeira cidade do Brasil a contar com uma usina fotovoltaica em um aterro sanitário para esse fim (CATVE, 2024).

Essa iniciativa é um avanço significativo em direção à sustentabilidade. A usina também desempenha um papel importante na redução das emissões de gases de efeito estufa e na melhoria da qualidade do ar na região (CLICK PETRÓLEO E GÁS, 2024). A Figura 16 mostra a usina fotovoltaica e os geradores que produzem eletricidade a partir do biogás, destacando a integração de fontes renováveis no aterro.

**Figura 16:** (a) Usina fotovoltaica do aterro (b) Geradores de eletricidade.



Fonte: Itaipu Binacional (2024); Souza (2020).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Aspectos Ambientais, Sociais e Econômicos da Adoção do Sistema Híbrido de Geração de Energia (Biogás + Solar) em Aterros Sanitários.**

#### **4.1.1 Benefícios ambientais**

A instalação de energia solar fotovoltaica em aterros sanitários oferece benefícios ambientais, como a redução de emissões de gases de efeito estufa e o aproveitamento de áreas subutilizadas, contribuindo para a sustentabilidade ao evitar o desmatamento de novas áreas (IRENA, 2019; CHAVES, 2020).

No que diz respeito ao sistema híbrido de biogás e energia solar fotovoltaica, um estudo da *Revista de Energia Renovável* aponta que esse modelo pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de fontes fósseis, promovendo maior segurança energética e auxiliando na mitigação das mudanças climáticas (TANAKA *et al.*, 2019). Além disso, a integração dessas fontes pode otimizar o uso de recursos e tornar os sistemas de geração mais resilientes e eficientes (CHAVES, 2020).

#### **4.1.2 Benefícios sociais**

A geração de energia renovável em aterros sanitários não só oferece benefícios ambientais, mas também sociais significativos. A instalação de sistemas solares fotovoltaicos nesses locais pode melhorar o acesso à eletricidade, ajudando a reduzir as desigualdades no fornecimento de energia e promovendo a melhoria das condições de vida das comunidades locais (IRENA, 2019). Além disso, o aproveitamento do biogás como fonte de energia pode gerar novos empregos e estimular a economia local, contribuindo para o desenvolvimento social das regiões onde esses projetos são implementados (VIEIRA *et al.*, 2015).

A combinação do biogás com a energia solar fotovoltaica em sistemas híbridos também traz benefícios sociais adicionais, como a melhoria da qualidade do ar e a redução dos impactos negativos na saúde pública (CHAVES, 2020). A redução das emissões de poluentes pode resultar em uma melhor saúde para as comunidades e em menores custos com saúde, conforme demonstrado por estudos sobre o impacto das energias renováveis na saúde pública (CHAVES, 2020). Segundo Müller *et al.* (2017), a integração dessas tecnologias pode contribuir para o desenvolvimento de comunidades mais resilientes e sustentáveis, equipadas para enfrentar desafios energéticos e ambientais de maneira eficaz.

Em um estudo, Souza *et al.* (2020) destacam que essas iniciativas também podem

estimular a participação da comunidade local em projetos de energia renovável, promovendo a conscientização e o engajamento em torno das questões ambientais e sociais.

#### **4.1.3 Benefícios econômicos**

A geração de energia a partir do biogás pode proporcionar uma significativa redução nos custos de gestão de resíduos, podendo chegar a uma economia de até 50% (VIEIRA *et al.*, 2015). Além disso, a venda da energia gerada pelo biogás pode se tornar uma fonte constante de receita para os municípios ou empresas responsáveis pela operação de aterros, como demonstrado em estudos de integração de biogás e energias renováveis (MÜLLER *et al.*, 2017).

A energia solar fotovoltaica, por sua vez, destaca-se pelo baixo custo de operação e manutenção, o que gera um retorno sobre investimento bastante favorável ao longo do tempo (IRENA, 2019). Quando implantada em aterros sanitários, a energia solar oferece uma alternativa acessível e sustentável, com custos consideravelmente menores em comparação com fontes tradicionais, como as usinas termelétricas e hidrelétricas (CHAVES, 2020).

Entretanto, os custos iniciais de implementação ainda são um desafio. A geração de energia a partir de biogás apresenta um custo médio entre R\$ 345 e R\$ 440 por MWh, enquanto a energia solar varia de R\$ 200 a R\$ 300 por MWh (SILVA; OLIVEIRA; PEREIRA, 2019). Contudo, a adoção de sistemas híbridos, que combinam ambas as fontes de energia, pode reduzir esses custos ao aproveitar a infraestrutura já existente e otimizar a eficiência operacional dos aterros (PINHEIRO, 2021). Esse modelo também minimiza a necessidade de fontes de energia de backup, como as termelétricas, o que não só diminui os custos operacionais como também melhora a eficiência na utilização de recursos (SMITH; JOHNSON, 2018).

De acordo com Nunes *et al.* (2022), a implementação de sistemas híbridos em aterros também pode potencializar a geração de energia e oferecer um melhor aproveitamento da área disponível, permitindo que os aterros desativados sejam mais produtivos de forma econômica e ambientalmente eficiente.

#### **4.2 Vantagens e Desvantagens Geração de Energia renovável em Aterros Sanitários.**

A geração de energia renovável em aterros sanitários apresenta diversas vantagens quando se utiliza o biogás, a energia solar fotovoltaica ou a combinação de ambas. O biogás permite a geração contínua de energia elétrica, independentemente das condições climáticas (SOUZA *et al.*, 2018), e contribui significativamente para a redução de gases de efeito estufa,

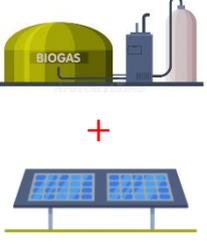
como o metano, altamente poluente (CARVALHO, 2020). Além disso, trata-se de uma fonte de energia limpa e reciclada, com menor impacto ambiental e crescente incentivo no Brasil (LIMA et al., 2016). Contudo, sua implementação demanda altos investimentos em infraestrutura, como sistemas de tubulação e equipamentos especializados, além de sua eficiência depender da composição dos resíduos e da idade do aterro (SOUZA et al., 2018; CARVALHO, 2020).

A instalação de sistemas solares fotovoltaicos em aterros também se destaca por transformar áreas degradadas e de difícil uso em locais produtivos. Entre suas vantagens, destacam-se o reaproveitamento econômico de áreas com baixa demanda de desenvolvimento, o uso de espaços que não são adequados para construções comerciais ou residenciais, e a preservação de terras para outros serviços ecossistêmicos, como sumidouros de carbono (USEPA, 2013). Essas áreas geralmente estão próximas a redes de transmissão e podem ser facilmente designadas como zonas de energia renovável, além de gerarem oportunidades de emprego e impulsionarem tecnologias limpas (USEPA, 2013). Os aterros solares também evitam o uso de novas áreas, pois os sistemas fotovoltaicos exigem baixa qualidade do solo, sendo viáveis para instalação diretamente sobre a cobertura dos aterros (GU et al., 2022). Entretanto, existem limitações, como problemas com recalques, restrições legais, limites de carga, inclinações desfavoráveis e a possível distância até pontos de interconexão elétrica (EPA, 2005).

Já os sistemas híbridos, que combinam biogás e energia solar, trazem como principal vantagem a estabilidade e confiabilidade na oferta energética. O biogás fornece eletricidade continuamente, enquanto a energia solar complementa essa produção durante o dia, especialmente nos horários de maior demanda (TANAKA et al., 2019; SMITH; JOHNSON, 2018). A integração permite um uso mais eficiente da área do aterro, que pode abrigar ambas as tecnologias sem necessidade de expansão territorial (CHAVES, 2020), promovendo geração de energia limpa e gestão sustentável dos resíduos (LIMA et al., 2021). Contudo, esse modelo também enfrenta desafios como os altos custos iniciais, a necessidade de integração tecnológica entre os sistemas e a demanda por equipes técnicas especializadas para garantir seu bom funcionamento (CHEN et al., 2018; LIMA et al., 2021; TANAKA et al., 2019).

Para melhor visualizar as vantagens e desvantagens de cada método e da associação dos dois, a tabela a seguir apresenta uma comparação entre biogás, energia fotovoltaica e a combinação híbrida de ambos:

**Quadro 7:** Vantagens e desvantagens do uso de energias renováveis em aterro.

	<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
<p><b>BIOGÁS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geração de energia elétrica que reduz custos e gera receita.</li> <li>• Contribui para a oferta de energia renovável e modelo de economia sustentável.</li> <li>• Reduz emissões de GEE e possibilita a comercialização de certificações de redução.</li> <li>• Menor impacto ambiental em comparação com combustíveis fósseis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependência de condições específicas do aterro para produção de biogás.</li> <li>• Necessidade de tecnologia e manutenção contínuas.</li> <li>• Pode haver resistência local a novos projetos de aterro.</li> </ul>
<p><b>SISTEMAS FOTOVOLTAICOS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reutilização de áreas não aproveitáveis, evitando custos de limpeza.</li> <li>• Infraestrutura existente facilita o transporte e instalação dos sistemas.</li> <li>• Geração de empregos em comunidades urbanas e rurais.</li> <li>• Preserva áreas de valor ecológico, contribuindo para a sustentabilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restrições legais que podem limitar a instalação.</li> <li>• Problemas de recalques e restrições de cobertura podem afetar a viabilidade.</li> <li>• Desafios logísticos como distância ao ponto de interconexão e topografia do terreno.</li> </ul>
<p><b>SISTEMA HÍBRIDO</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximiza o uso do terreno, combinando a geração de energia renovável e o aproveitamento de resíduos.</li> <li>• A sinergia pode potencializar a redução de custos e aumentar a eficiência energética.</li> <li>• Contribui para a economia circular, transformando resíduos em energia de forma sustentável.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integração complexa entre os dois sistemas que pode exigir planejamento adicional.</li> <li>• Desafios técnicos na coordenação da operação dos dois sistemas simultaneamente.</li> <li>• Necessidade de análises ambientais e de viabilidade mais rigorosas para garantir compatibilidade</li> </ul>

### **4.3 Perspectivas Futuras do Uso de Energias Renováveis em Aterros Sanitários no Brasil e no Mundo**

A tendência mundial está cada vez mais voltada para a integração de fontes renováveis em aterros sanitários, como os sistemas híbridos de biogás e energia solar, que proporcionam uma geração de energia mais eficiente e estável (PINHEIRO, 2021). No Brasil, com o avanço das políticas de incentivo, como a expansão do mercado de biometano e os leilões de energia renovável, espera-se um aumento considerável na utilização do biogás em aterros sanitários nos próximos anos (UNIVATES, 2021).

Nos Estados Unidos e na União Europeia, observa-se um crescimento dos investimentos em tecnologias avançadas para otimizar a captura de biogás, incluindo processos de purificação para biometano e cogeração de energia elétrica e térmica (GNPW Group, 2022). Além disso, a digitalização do setor energético, com o uso de sistemas de monitoramento remoto e inteligência artificial, oferece a possibilidade de melhorar a previsibilidade da geração de energia e reduzir custos operacionais das usinas de biogás e fotovoltaicas (PINHEIRO, 2021). O futuro aponta para a ampliação do uso de aterros sanitários como fontes híbridas de energia renovável, com o potencial de integrar tecnologias como células de combustível e sistemas de armazenamento de energia, o que aumentaria ainda mais a eficiência desses sistemas (SILVA; OLIVEIRA; PEREIRA, 2019). Isso tornaria a transição para um modelo sustentável de gestão de resíduos uma possibilidade concreta, tanto no Brasil quanto no mundo.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A crescente demanda por diversificação da matriz energética e fontes renováveis tem incentivado a criação de tecnologias sustentáveis, incluindo na gestão de resíduos urbanos. Nesse cenário, os aterros sanitários se destacam como locais estratégicos para a geração de energia limpa, utilizando tanto o biogás gerado pela decomposição dos resíduos quanto a energia solar fotovoltaica, uma solução viável graças à grande área disponível para painéis solares. Além disso a adoção de sistemas híbridos nesses locais representa uma solução eficiente para aumentar a estabilidade da geração elétrica, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e minimizando os impactos ambientais associados à destinação de resíduos.

O exemplo do Aterro Metropolitano de Salvador evidencia como o biogás pode ser aproveitado para a geração de eletricidade em larga escala, promovendo benefícios ambientais e contribuindo para a redução das emissões de carbono. Da mesma forma, a experiência do

Aterro Caximba, em Curitiba, demonstra o potencial da energia solar fotovoltaica como complemento à matriz energética dos aterros sanitários, aproveitando áreas anteriormente destinadas ao descarte de resíduos para a instalação de usinas solares. O caso do Aterro de Cascavel, no Paraná, destaca a importância da integração entre biogás e energia solar em um sistema híbrido, otimizando a eficiência energética e promovendo um uso sustentável dos recursos disponíveis.

Em um contexto global, países como Alemanha, Estados Unidos e Japão já demonstram que a integração de sistemas híbridos de geração de energia em aterros sanitários pode ser uma solução viável e eficaz para o setor de resíduos sólidos. No Brasil, apesar dos desafios relacionados a investimentos e regulamentação, a tendência é de crescimento na adoção dessas tecnologias, impulsionada pela necessidade de uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Portanto, a geração de energias renováveis em aterros sanitários, por meio do biogás e da energia solar fotovoltaica, representa uma estratégia promissora para conciliar desenvolvimento sustentável, mitigação das mudanças climáticas e diversificação da matriz energética brasileira. A adoção de sistemas híbridos fortalece ainda mais essa abordagem, potencializando os benefícios ambientais, sociais e econômicos. O avanço tecnológico e a implementação de políticas públicas adequadas serão fundamentais para expandir essa prática no país, tornando os aterros sanitários não apenas espaços para a destinação de resíduos, mas verdadeiras usinas de energia limpa para as futuras gerações.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABLP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA. Valorização energética do biogás de aterros sanitários. **Revista Limpeza Pública**, São Paulo, ed. 105, 1º sem. 2021.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo: ABRELPE, 2013.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 24 jun. 2025.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama>. Acesso em: 26 maio 2025.

ABREU, F. V.; FILHO, M. A. F. C.; SOUZA, M. C. L. **Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpa: um estudo de viabilidade técnica e econômica.** São Cristóvão-RJ, 2009.

ALEMDA ENERGIA. **Cascavel (PR) amplia uso do biogás em seu aterro sanitário.** 2021. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/cascavel-pr-amplia-uso-do-biogas-em-seu-aterro-sanitario/>. Acesso em: 14 fev. 2025.

ALVES, M. O. L. **Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos ON-GRID e OFF-GRID.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019.

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico.** 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ARCHDAILY. **Curitiba transforma aterro sanitário em usina solar.** 2023. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/999229/curitiba-transforma-aterro-sanitario-em-usina-solar>. Acesso em: 14 fev. 2025.

BABIO, F. B. S. N. R. **Estudo de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede e seu custo/benefício.** 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Doctum de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

BARRAK, E. **Análise técnica e econômica da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos através da incineração e do gás de aterro sanitário.** 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

BARROS, T. F. **Geração de energia elétrica com biogás gerado em aterro sanitário: estudo de viabilidade técnico-econômico.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013

BORBA, R. T. **Fatores que afetam a geração de biogás em aterros sanitários.** In: LIMA, J. G. (org.). *Gestão de resíduos sólidos.* Rio de Janeiro: ABES, 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, ano 147, n. 148, p. 3-7, 3 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 22 jun. 2025.

BRITO, A. P. G.; OLIVEIRA, G. S.; SILVA, B. A. **A importância da pesquisa bibliográfica no desenvolvimento de pesquisas qualitativas na área de educação.** *Cadernos da FUCAMP*, v. 20, n. 44, p. 1–15, 2021.

CARVALHO, R. Emission reduction through biogas utilization in landfills: a sustainable approach. *Journal of Environmental Management*, 2020.

CATVE. **Usina fotovoltaica para abastecimento dos ônibus elétricos é inaugurada em Cascavel**. 2024. Disponível em: <https://catve.com/noticia/6/434642/usina-fotovoltaica-para-abastecimento-dos-onibus-eletricos-e-inaugurada-em-cascavel>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CHAVES, D. **Sistemas híbridos de geração de energia: biogás e solar fotovoltaica**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, 2020.

CHEN, X. et al. **Economic and operational challenges of hybrid renewable energy systems**. Energy Economics and Management, 2018.

CLICK PETRÓLEO E GÁS. **Itaipu inaugura usina solar de 3 megawatts em Cascavel e surpreende**. 2024. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/itaipu-inaugura-usina-solar-de-3-megawatts-em-cascavel-e-surpreende/>. Acesso em: fev. 2025.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

COSTA, F.; SILVA, R. A utilização de sistemas híbridos de biogás e solar em aterros sanitários no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Renovável**, v. 13, n. 2, p. 57–68, 2020.

CURITIBA (Município). **Plano de encerramento do Aterro Sanitário de Curitiba**. Curitiba, 2009.

DIÁRIO OFICIAL DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL – ESTADO DA BAHIA. **Termoverde Salvador S.A. – relatório da administração**. Salvador, 2021. Ano CV, n. 23.170.

DIAS, G. R.; FIGUEIRA NETO, M. S.; MARTINS, R. O. G. Dimensionamento de uma célula de aterro sanitário de pequeno porte para a cidade de Guajeru – BA. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 8, n. 6, p. 113–136, 2021.

EICHLER, P. et al. Metodologias de amostragem de siloxanos em biogás e biometano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 29, 2024. DOI: 10.1590/S1413-415220200210.

EKKO GREEN. **Curitiba vai construir usina solar em forma de pirâmide em aterro sanitário**. 2022. Disponível em: <https://ekkogreen.com.br/usina-solar-em-forma-de-piramide-curitiba>. Acesso em: 23 jul. 2022.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas-SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Best practices to locate solar photovoltaic in solid waste landfills municipality**. Communications, Partnerships and Analysis Office – Land and Emergency Management Office, May 2022. (540-R-22-003).

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidance for assessment of landfill gas emissions from closed facilities or abandoned. EPA-600-R-05-123a. Research and Development Office, 2005.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica**. PEA-2420 Produção de Energia. GEPEA – Grupo de Energia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

FERNANDES, G. L. et al. **Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 27, n. 1, 2022.

FERNANDES, J. A. F. et al. Energias renováveis: fonte de energia limpa? In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, XI, 2020, Vitória. Anais [...]. Vitória: IBEAS, 2019.

FLECK, L. et al. **Produção de biogás como fonte alternativa de energia: uma revisão**. Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia, Medianeira, v. 9, n. 24, p. 1–15, set./dez. 2018.

FNR – FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. **Guia prático do biogás: geração e utilização**. Gülzow: FNR, 2010.

FOLSTER, A. L. A. **Potencial de geração de energia solar fotovoltaica em lixões no Brasil**. 2019. 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

FREITAS, C. O.; MAKIYA, I. K. Potencial energético a partir do biogás proveniente de aterros sanitários do estado de São Paulo. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, XXXII, 2012, Bento Gonçalves. Anais [...]. Bento Gonçalves: ABEPRO, 2012.

FREITAS, K. P. M. **Geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos nos sistemas isolados amazonenses**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

G. GU et al. **Energy and financial analysis of the project landfill site: a case study in Qingyuan**. International Journal of Low-Carbon 2022, 17, 214–221 219.

GAZETA24HORAS. **Curitiba abre visitas guiadas à Pirâmide Solar da Caximba**. Disponível em: <https://www.gazeta24horas.com.br/uritiba-abre-visitas-guiadas-a-piramide-solar-da-caximba/>. Acesso em: 28 maio 2025.

GEHRKE, P.; GORETTI, A. A. T.; AVILA, L. V. Impactos da matriz energética no desenvolvimento sustentável do Brasil. **Revista de Administração da UFSM**, Santa Maria, v. 14, Especial ECOINOVAR, p. 1032–1049, set./out. 2021.

GHAFOOR, A.; MUNIR, A. Design and economics analysis of an off-grid PV system for household electrification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 496–502, 2015.

GNPW GROUP. **A importância dos resíduos sólidos urbanos na geração de energia!** 2021. Disponível em: <https://www.gnpw.com.br/energia-pt/a-importancia-dos-residuos-solidos-urbanos-na-geracao-de-energia/>. Acesso em: 5 ago. 2022.

ICLEI – GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE (São Paulo) (Org.). **Manual para aproveitamento de biogás: Volume I – Aterros sanitários**. São Paulo: ICLEI, 2009.

ITAIPU BINACIONAL. **Usina solar no aterro sanitário [imagem]**. Canal Solar, 2024. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/itaipu-aterro-usina-solar/>. Acesso em: 14 fev. 2025.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Photovoltaic degradation rates – An analytical review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 21, n. 1, p. 12–29, 2013.

KARLSSON, T. et al. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. da Univates, 2014. 69 p. ISBN 978-85-8167-073-7.

KIATREUNGWATTANA, K. et al. **Best practices for solar installation: Photovoltaic energy in the municipality solid waste landfill**. United States Environmental Protection Agency (EPA). Technical Report. NREL/TP-7A30-52615, fevereiro 2013. Agreement No. DE-AC36-08GO28308.

KUMAR, A. et al. Hybrid renewable energy systems for remote areas: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 137–153, 2017.

LIMA, A. et al. Biogas as a renewable energy source: environmental and economic impacts in Brazil. **Energy & Environment Journal**, 2016.

LIMA, J. G. **Gestão de resíduos sólidos urbanos: biogás e chorume em aterros sanitários**. São Paulo: Interciência, 2005.

LIMA, T. et al. Optimization of landfill energy use: the role of hybrid solar and biogas systems. **Renewable Energy Research**, 2021.

LOPES, M. C.; TAQUES, F. H. O desafio da energia sustentável no Brasil. **Revista Cadernos de Economia**, Chapecó, v. 20, n. 36, p. 71–96, 2016.

MAGALHÃES, A. P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano**. São Paulo: Nobel, 1986. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/388345289\\_DEVELOPMENT\\_OF\\_A\\_LOW-COST\\_BIODIGESTER\\_USING\\_HORSE\\_MANURE](https://www.researchgate.net/publication/388345289_DEVELOPMENT_OF_A_LOW-COST_BIODIGESTER_USING_HORSE_MANURE). Acesso em: 23 jun. 2025.

MARANHO, A. S. **Potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos para Bauru e região**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2008.

MATIAS, K. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos visando aplicação em aquecimento e cocção de alimentos em substituição ao gás natural**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal de Uberlândia, Natal, 2022.

MILANEZ, A. Y.; MAIA, G. B. S.; GUIMARÃES, D. D. Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 177–216, mar. 2021.

MILLARD, E. **How does solar on capped landfills work?** *Solar Power World*, 2019. Disponível em: <https://www.solarpowerworldonline.com/2019/07/how-does-solar-on-capped-landfills-work/>. Acesso em: 17 jul. 2022.

MONTAGNA, T. B. **Biogás produzido em aterro sanitário como fonte de energia – uma revisão bibliográfica**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – União de Ensino do Sudoeste do Paraná (UNISEP), Dois Vizinhos, 2013.

MÜLLER, J. et al. Exploração do biogás e da energia solar em aterros sanitários. **Journal of Renewable Energy**, v. 25, n. 3, p. 240–250, 2017.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectiva**. Consultoria Legislativa, Câmara dos Deputados. Brasília, 2017.

NUNES, M. et al. Aproveitamento de aterros sanitários: o potencial econômico e ambiental de sistemas híbridos de energia renovável. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 2022.

OLIVEIRA, A. J. R. et al. Analysis of biogas waste (landfill) applied to power generation. **Revista de Engenharia de Energia**, v. 38, n. 3, p. 175–187. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

OLIVO, G. L.; RIZK, M. C. Comparação entre tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, v. 1, n. 1, 2021. DOI: 10.24979/ambiente.v1i1.924.

O'ROURKE, S. et al. Hybrid energy systems for landfill sites: a pathway to a sustainable future. **Energy Sustainability & Society**, v. 10, n. 1, p. 34, 2020.

PAINEL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Pirâmide Solar do Caximba**. 2023. Disponível em: <https://paineldemudancasclimaticas.org.br/noticia/piramide-solar-do-caximba>. Acesso em: 12 fev. 2025.

PASSOS, F. M. **Análise do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos do município de Aracaju/SE**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019

PECORA, V. **Tecnologias limpas para aproveitamento energético do biogás**. São Paulo: CETESB, 2006.

PIÑAS, J. A. V. et al. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil. **Revista Brasileira de Estudos de População**, Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p. 175–188, jan./abr. 2016.

PINHEIRO, S. G. **Relatório técnico sobre a geração híbrida de energia renovável: sistema biogás e fotovoltaico em uma estação de tratamento de esgotos**. Instituto Federal Fluminense, 2021.

PREFEITURA DE CURITIBA. **Obras da usina solar do Caximba avançam e há vagas para trabalhadores [imagem]**. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/obras-da-usina-solar-do-caximba-avancam-e-ha-vagas-para-trabalhadores/65908>. Acesso em: 28 maio 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA – PMC. **Edital de licitação nº 24/2021**. Curitiba, 2021.

PV MAGAZINE BRASIL. **Itaipu Binacional investe R\$ 3 milhões e transforma aterro sanitário em usina fotovoltaica com capacidade de 25 MW**. 2024. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2024/12/04/itaipu-binacional-investe-r-3-milhoes-e-transforma-aterro-sanitario-em-usina-fotovoltaica-com-capacidade-de-25-mw/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

REZENDE, A. G. O. B. **Avaliação do potencial energético e econômico do tratamento, destinação e reutilização de resíduos sólidos urbanos (RSU)**. 1. ed. Rio de Janeiro: Conexão Ciência (Online), 2016.

RIBEIRO, G. F. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid em um motorhome**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS, Brasília.

RODRIGUES, J. S. **Painéis fotovoltaicos em aterros sanitários: oportunidades de promoção de desenvolvimento sustentável**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energias Renováveis) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

ROTHER, E. T. Revisão sistemática x revisão narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. v–vi, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ape/a/Vz8vzG6zYSh3SJJhLtMJ5cB/?lang=pt>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SALASOVICH, J.; MOSEY, G. **Feasibility study of economics and performance of solar photovoltaics at the Refuse Hideaway Landfill in Middleton, Wisconsin**. United States, 2011. Web. doi:10.2172/1023047.

SAMPSON, G. **Solar energy installations in closed landfills: technical and regulatory considerations**. National Network for Environmental Management Studies (NNEMS). US Environmental Protection Agency (EPA), 2009.

SANGIORGIO, S.; FALCONI, M. Technical feasibility of a photovoltaic plant in sanitary landfills: a case study Sylvania. **Energy Procedia**, v. 82, p. 759–765, 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.807.

SANTAELLA, S. T. et al. **Resíduos sólidos e a atual política ambiental brasileira**. Fortaleza: UFC / LABOMAR / NAVE, 2014. 232 p. (Coleção Habitat, v. 7). ISBN 978-85-420-0326-0.

SANTOS, D. C. et al. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: desafios e perspectivas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 29, 2024.

SANTOS, L. O.; TAUCHEN, J. A. Uso do biogás proveniente de um aterro sanitário para geração de energia elétrica: estudo de caso do aterro municipal de Cascavel - PR. 2010.

SBRISSIA, G. F.; ELMOR, S. **Caximba**: transformação de passivo ambiental em ativo urbano. IBGC, 2024.

SECIUK, C. Geração de energia a partir do lixo: por que ela não deslanchou e quais as perspectivas. **Gazeta do Povo**, 2022. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/residuos-solidos-urbanos-por-que-geracao-de-energia-a-partir-do-lixo-por-que-nao-deslanchou/>. Acesso em: 5 ago. 2022.

SILVA, A. P. C. **Proposta de usina de bioenergia inserida em um aterro sanitário no município de Mandirituba - PR**. 2021. Artigo (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Universitário Curitiba, Curitiba, 2021.

SILVA, A.; OLIVEIRA, P.; PEREIRA, M. Economia de energia solar e biogás: potencial de geração em aterros sanitários. **Journal of Energy Economics**, 2019.

SILVA, L. R. O.; TESHIMA, R. H. L. **Estudo sobre a utilização de fontes de energias renováveis e suas principais tendências**. Centro Universitário CESMAC, Maceió-AL, 2018.

SILVA, R. A.; OLIVEIRA, M. F.; PEREIRA, R. L. Energy potential using landfill biogas and solar photovoltaic system: a case study in Brazil. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 4, p. 849–861, 2019.

SILVA, T. N. **Diagnóstico da produção de biogás em um aterro sanitário: estudo de caso no Aterro Bandeirantes**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2006.

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N.; CANDIANI, G. **Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 97–104, abr./jun. 2013. DOI: 10.1590/S1413-41522013000200002.

SILVA, W. O. B. **Aterros sanitários e os resíduos sólidos**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Direito) – Fundação Educacional do Município de Assis – FEMA, Assis, 2020.

SINGH, S. et al. Maintenance and repair of hybrid renewable energy systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 266–275, 2018.

SMITH, J.; JOHNSON, P. Viabilidade econômica da integração de biogás e energia solar em aterros. **Energy Policy**, v. 65, p. 136–145, 2018.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Do SNIS ao SINISA**: Informações para planejar o manejo de resíduos sólidos. Diagnóstico SNIS-RS 2019. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Brasília, dez. 2020.

SOLVÍ – **Soluções para a Vida. Recuperação energética de RSU como ferramenta de desenvolvimento econômico e ambiental: perspectivas e repercussões no setor privado.** Recife, 2019.

SOUZA, A. A. **Análise da geração de biogás em aterro sanitário: estudo de caso do aterro sanitário de Cascavel.** 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020.

SOUZA, P. et al. Biogas energy generation in landfills: challenges and advantages. **Renewable Energy Review**, 2018.

SZABÓ, S. et al. A methodology to maximize the benefits of indoor solar landfills. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1291–1300, 2017.

TANAKA, K. et al. Sistemas híbridos de biogás e solar: impacto ambiental e econômico. **Energy for Sustainable Development**, v. 50, p. 35–44, 2019.

TANSEL, B. **Solar energy harvesting at closed landfill sites.** Knovel Corporation, 2011.

TAVARES, A. N. et al. **Oportunidades enterradas: geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos.** Universidade Federal do Espírito Santo, 2019.

TAVARES, R. O. **Estudo do potencial energético nos aterros sanitários do Brasil.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Cornélio Procopio, 2018.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2016.

TRENTINI, M.; PAIM, L. **Pesquisa em Enfermagem: uma modalidade convergente-assistencial.** Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.

TRIBUNA DO PARANÁ. Aterro da Caximba vai virar usina solar pra produzir energia limpa para Curitiba. **Tribuna do Paraná**, 2021. Disponível em: <https://tribunapr.uol.com.br/noticias/curitiba-regiao/aterro-da-caximba-vai-receber-paineis-e- virar-usina-solar-pra-produzir-energia-limpa-para-curitiba/>. Acesso em: 23 jul. 2022.

UCZAI, P. **Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade.** Brasília: Centro de Documentação e Informação, Edições Câmara, 2012. 273 p. (Série Cadernos de Altos Estudos; n. 10). ISBN 978-85-7365-974-0.

UNIVATES. Análise da viabilidade econômica e ambiental do aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários no Brasil. **Revista Estudo & Debate**, 2021.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Best practices for siting solar photovoltaics on municipal solid waste landfills.** 2013.

VIEIRA, L. et al. Aproveitamento energético de biogás em aterros sanitários. **Engenharia Ambiental**, v. 45, n. 2, p. 301–312, 2015.

ANEXO

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES  
TÉCNICO- CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico- científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |                                                                |                                                         |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Tese                                  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação                           | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização           | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação            | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: | _____                                                   |

Nome Completo do Autor: Gabrielle Aparecida Arantes Martins

Matrícula: 2017102200740297

Título do Trabalho: A GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM ATERROS SANITÁRIOS:  
BIOGÁS E SOLAR FOTOVOLTAICA

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 26/06/2025

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

A referida autora declara que:

1. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
2. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
3. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 25/06/2025.

Documento assinado digitalmente



GABRIELLE APARECIDA ARANTES MARTINS

Data: 27/06/2025 08:31:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Documento assinado digitalmente



BRUNO DE OLIVEIRA COSTA COUTO

Data: 25/06/2025 17:18:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo: \_\_\_\_\_

Assinatura do(a) Autor(a)