



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Faculdade de Engenharia e Ciências  
Câmpus de Rosana



Sabrina Alves da Silva

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA A BIOGÁS NO  
MUNICÍPIO DE ROSANA

Rosana

2025

Sabrina Alves da Silva

TÍTULO: ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA A  
BIOGÁS NO MUNICÍPIO DE ROSANA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador (a): Prof. Dr. Maria Claudia Costa de Oliveira Botan

Rosana

2025

S586a

Silva, Sabrina Alves

Análise da viabilidade de implantação de uma usina a biogás no município de Rosana / Sabrina Alves Silva. -- Rosana, 2025

34 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientadora: Maria Claudia Costa de Oliveira Botan

1. Aproveitamento energético. 2. Sustentabilidade. 3. Biogás. 4. Resíduos Sólidos Urbanos. I. Título.

Sabrina Alves da Silva

TÍTULO: ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA A  
BIOGÁS NO MUNICÍPIO DE ROSANA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia.

Rosana, \_8\_ / \_Dezembro\_ / \_2025\_.

Componentes da Banca Examinadora:

Maria Claudia Costa de Oliveira Botan

---

Presidente e Orientador: Nome e título, Câmpus de ..., Universidade...

Andreia Cressoni De Conti

---

Membro Titular: Nome e título, Câmpus de..., Universidade...

Antônio Carlos Barkett Botan

---

Membro Titular: Nome e título, Câmpus de..., Universidade...

\*A data de aprovação e as assinaturas dos membros componentes da banca examinadora devem ser colocadas após a aprovação do trabalho. Dica: escaneie a folha depois de assinada e assim como na folha da ficha catalográfica utilize Adobe Pro ou outros recursos que juntam arquivos PDF.

Gostaria de dedicar este trabalho a  
Deus, e as pessoas mais importante  
da minha vida, meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Sou extremamente agradecida a Deus, por cada detalhe que ele cuida da minha vida, eu não teria conseguido terminar este trabalho se Deus não tivesse do meu lado. Ele colocou sempre coloca pessoas maravilhosas na minha vida que sempre me incentiva á persistir, e nunca desistir. Gostaria de agradecer meu país, meu irmão e o resto da minha família, nada seria possível sem o apoio de todos. Minhas palavras são pouco do tanto que sou grata por ter uma família que sempre fez e faz de tudo para apoiar os meus sonhos, amo cada um.

A minha orientadora Maria Claudia só tenho a agradecer, não conseguiria concluir o presente trabalho sem o apoio e incentivo dela, maravilhosa como sempre. Também gostaria de deixar minha gratidão os meus professores e o coordenador do curso que sempre foram excelentes, sempre incentivam os alunos e nos apoiam.

Gostaria de agradecer também Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" na cidade de Rosana e a unidade de Araraquara que oferece o CUCA o cursinho alternativo, onde tive uma oportunidade de conhecer a UNESP.

Os funcionários maravilhosos da faculdade que se tornaram amigos importantes. Muito obrigada equipe do administrativo, coordenação e todos que fazem parte da Unesp. Não seria justa se não agradece ao auxílio socioeconômico, pois não seria possível a graduação sem o auxílio.

A todas as lindas da Americana (Ana Patrícia, Mariana, Amanda, Giovanna, Lara, Gabrieli, Nicole) aos agregados da república (pessoal da casa do papai Noel e entre outros grupos), e os meus amigos que fiz durante a graduação sempre levarei vocês no meu coração, os 5 anos de faculdade não seria a mesma coisa sem vocês, amo todos e obrigada pelos cafés, almoços, e noites de pijamas. Não poderia deixar de agradecer aos amigos de sempre, mesmo eu não construindo prédio eles sempre estão do meu lado para tudo. Aos meus colegas de sala que sempre caminhamos juntos, sou grata. As meninas de Ribeirão Preto, que são incríveis. Não seria justo colocar nomes.

Estou profundamente agradecida por estar concluindo mais esta etapa da minha vida ao lado de pessoas incríveis que fizeram parte dessa jornada. A cada um que me apoiou, incentivou e acreditou em mim, deixo minha sincera gratidão. Mais uma vez, muito obrigada a todos.

Jesus olhou para eles e respondeu:  
- Para os seres humanos isso não é possível; mas para Deus, tudo é possível. Matheus 19:26

## RESUMO

Antes da Revolução Industrial, os RSU (resíduos sólidos urbanos) eram compostos por material orgânico, mas à partir do século XXI, o acúmulo de resíduos tornou-se um problema significativo, resultando em grandes montanhas de resíduos. Baseando-se nisso este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade da implantação de uma usina de aproveitamento de biogás para geração de energia no município de Rosana (SP), com foco na gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Abordando o contexto da crescente demanda por soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos, destacando a legislação vigente, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Novo Marco Legal do Saneamento Básico. A metodologia adotada envolveu a projeção populacional com base em taxa de crescimento constante, estimativas de geração de resíduos *per capita* e o uso do software LandGEM® para simular a produção de metano ao longo de 17 anos. Também foram aplicadas equações para calcular o potencial energético do biogás e analisar a viabilidade econômica por meio do Valor Presente Líquido (VPL) e do Custo Nivelado de Energia (LCOE). Os resultados indicam que, mesmo com uma população reduzida, Rosana possui potencial para gerar energia a partir do biogás, atingindo retorno financeiro a partir do décimo primeiro ano de operação. A iniciativa contribuiria para a descentralização da matriz energética e para a mitigação dos impactos ambientais associados aos resíduos sólidos urbanos, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e eficiência energética.

**Palavras-chave:** Biogás. Resíduos Sólidos Urbanos. Sustentabilidade. Aproveitamento energético. Aterro sanitário.

## ABSTRACT

Before the Industrial Revolution, municipal solid waste (MSW) consisted mainly of organic material; however, in the 21st century, waste accumulation has become a significant problem, resulting in large mountains of discarded materials. Based on this scenario, this study aims to analyze the feasibility of implementing a biogas utilization plant for energy generation in the municipality of Rosana (SP), with a focus on the proper management of municipal solid waste (MSW). The research addresses the growing demand for sustainable solutions for waste treatment, highlighting current regulations such as the National Solid Waste Policy and the New Legal Framework for Basic Sanitation. The methodology adopted involved population projection based on a constant growth rate, estimates of per capita waste generation, and the use of the LandGEM® software to simulate methane production over a 17-year period. Equations were also applied to calculate the energy potential of biogas and to analyze economic feasibility through the Net Present Value (NPV) and the Levelized Cost of Energy (LCOE). The results indicate that, even with a small population, Rosana has the potential to generate energy from biogas, achieving financial return from the eleventh year of operation. The initiative would contribute to the decentralization of the energy matrix and to mitigating the environmental impacts associated with municipal solid waste, aligning with the principles of sustainability and energy efficiency.

**Keywords:** Biogas. Municipal Solid Waste. Sustainability. Energy Recovery. Sanitary Landfill.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Situação da disposição final de RSU no Brasil.....	14
Figura 2 – Situação do Aterro Sanitario de Rosana. ....	17
Figura 3 – Placa indicativa da construção do centro de triagem. ....	15
Figura 4 – Demonstração de como funciona aterro sanitario.....	15
Figura 5 – Entradas dos dados no LandGEM®. ....	28
Figura 6 – Vazão de metano em Mg por ano. ....	28
Figura 7 – Valor Presente Líquido (VPL). ....	29

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
RSU	Resíduos Sólidos Urbano
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$k$	Taxa de produção de metano
$L_0$	Potencial de produção de metano
$Q_{CH_4}$	Geração anual de CH <sub>4</sub> por ano em m <sup>3</sup> ·ano;
$i$	Incremento de tempo de 1 ano;
$n$	Ano do cálculo – ano inicial de aceitação de resíduos;
$j$	Incremento de tempo de 0,1 ano;
$k$	Taxa de decaimento da geração de metano em 1/ano;
$L_0$	Potencial de geração de CH <sub>4</sub> em m <sup>3</sup> /ton;
$M_i$	Massa de resíduos aceita no i-ésimo ano em ton;
$t_{ij}$	Idade da j-ésima seção de massa residual aceita no i-ésimo ano.
$Q_{coletado}$	Vazão coletada de biogás em cada ano, em m <sup>3</sup> ·ano;
$\eta_{coletado}$	Eficiência de coleta;
$P$	Potência disponível em kW;
$\eta$	Rendimento da conversão energética
$PCI$	Poder calorífico do biogás;
$E$	Energia disponível anualmente, em MWh/ano;
$F_c$	Fator de capacidade, de 80%, conforme Santos <i>et al.</i> (2018);
$t$	Tempo de operação, em h/ano.
$E_n$	Energia produzida pela potência ótima no ano de análise;
$T$	Tarifa de venda de energia, em R\$/MWh;
$C_{om}$	Custo de operação e manutenção, em R\$/ano;
$i$	Taxa de juros;
$I$	Investimento inicial, em R\$;
$m$	Vida útil do projeto, em anos;
$n$	Ano de análise;
$C_n$	Custo associado ao empreendimento em cada ano.
$P_{trc}$	População estimada pelo modelo com taxa de crescimento ao ano $t$ ;
$P_0$	Dados de população histórica relativos ao longo dos anos
$r$	Taxa de crescimento percentual média da cidade;
$t$	Ano atual;

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 Aterro Sanitário .....	17
2.2 Biogás .....	18
2.1.1 Geração de biogás em aterros .....	19
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 Dados do Município .....	22
3.2 Cálculos de Geração de Biogás .....	22
3.3 Análise da viabilidade econômica .....	25
4 RESULTADOS .....	27
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	30
6 CONCLUSÃO.....	30

## 1 INTRODUÇÃO

A mobilização global em benefício da preservação ambiental e da sustentabilidade, vem tomando forma ao enfrentar as mudanças climáticas. Antes da Revolução Industrial, os resíduos sólidos eram compostos predominantemente de material orgânico, que se degradava naturalmente no meio ambiente. No entanto, com o consumismo e o avanço dos meios de produção, o acúmulo de resíduos tornou-se um problema significativo, resultando em grandes montanhas de rejeitos. Segundo Catapreta (2008), a disposição inadequada dos resíduos pode contaminar o solo e o ar, além de atingir os lençóis freáticos, o que causa diferentes doenças.

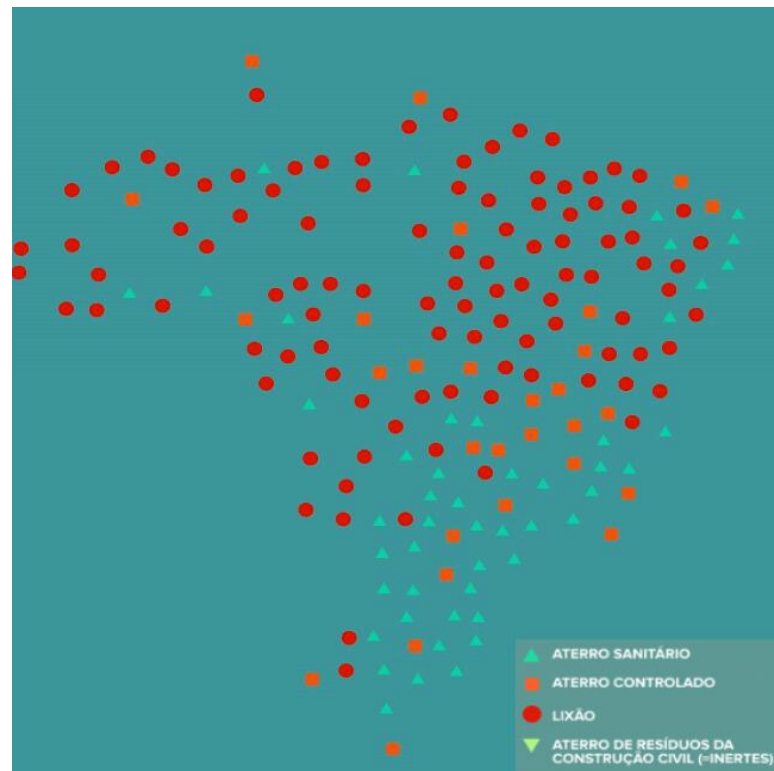
O Panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais elaborado pela ABREMA (Associação brasileira de resíduos e meio ambiente, 2024), revela que os resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no Brasil em 2022, somaram 81.811.506 toneladas, o que equivale a cerca de 224 mil toneladas diárias. O relatório aponta que os resíduos estão diminuindo, devido a pandemia da covid 19, onde as pessoas tiveram que ficar em suas residências. O panorama discorre que 60,5% dos RSU vão para a disposição adequada.

Conforme a Lei Federal nº12.305 (Brasil, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os rejeitos urbanos deveriam ser descartados de forma ambientalmente correta até agosto de 2014. A medida visava garantir o tratamento adequado dos resíduos sólidos urbanos. Considerando a Lei nº 14.026 (Brasil, 2020), que estabeleceu o Novo Marco Legal do Saneamento Básico, os lixões deveriam ser desativados até dezembro de 2024, com a adoção de aterros sanitários ou soluções alternativas. Infelizmente, mais uma vez, presenciamos a falta de cumprimento de prazos legais e o país ainda possui os famosos “lixões”.

O principal objetivo da política nacional de resíduos sólidos é estabelecer condutas para a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU), considerando desde a não geração até a redução, reutilização, reciclagem e tratamentos desses resíduos. Englobando também a rotulagem ambiental e ações de conscientização para incentivar práticas sustentáveis entre os consumidores (São Paulo, 2014).

O biogás é uma das formas de diversificação energética na matriz energética brasileira. Segundos Santos *et al.* (2015), aterros sanitários correspondem uma oportunidade para micro e pequenas geração de energia, ajudando na descentralização da matriz energética. Catapreta (2008) aborda as diferentes formas de disposição dos resíduos, como lixões, disposição direta no solo, aterros controlados e aterros sanitários, a última é a solução sugerida pela Lei nº 14.026 (Brasil, 2020) para descarte de resíduos.

Figura 1 - Situação da disposição final de RSU no Brasil.



Fonte: (Brasil, 2019).

Conforme dados do mapa o Brasil conta com 2.181 municípios que realizam destinação adequada de resíduos em aterro sanitário, enquanto 703 municípios contam aterro controlados e 1.110 ainda destinam seus resíduos com lixões (Brasil, 2019). Mas estes municípios estão sendo supervisionados? Os dados acima evidenciam que parcela dos municípios precisam revisar suas gestões de resíduos.

Portanto, aterro sanitário é uma solução para rejeitos de resíduos sólidos urbanos, projetado para minimizar os impactos ambientais e diminuir os riscos à saúde pública. De acordo com Andrade (2022), aterro sanitário é um projeto de engenharia no qual é escolhido um lugar apropriado e afastado da cidade para descarte de resíduos urbanos. Neste local, é realizada a cobertura do solo com manta impermeável, o controle dos gases emitidos, possibilitando reaproveitamento de gases para geração de energia, e controle da lagoa de chorume, evitando contaminação do solo e água.

De acordo com o então secretário de Meio Ambiente do município de Rosana (Amarildo Machado Valadão), o município encontra-se em conformidade com a norma técnica da CETESB para aterros sanitários em vala, a qual é recomendada para localidades com população inferior a 20 mil habitantes e produção diária de resíduos menor que 10 toneladas.

A administração municipal informou que a produção diária de resíduos no município é de aproximadamente 9 toneladas. O sistema implantado compreende valas com dimensões de 60 metros de comprimento por 3 metros de largura, totalizando 180 m<sup>2</sup> por unidade. Atualmente, o aterro conta com 95 valas, o que resulta em uma área total ocupada de 17.100 m<sup>2</sup>. O empreendimento possui licenciamento ambiental vigente até o ano de 2026.

Figura 2 - Situação do Aterro Sanitário de Rosana.



Fonte: Arquivo pessoal.

No local, foi possível verificar que é realizado apenas a cobertura com terra dos resíduos. Não há qualquer tipo de proteção no solo e segurança no local. Há uma placa indicando a construção de um centro de triagem de coleta seletiva, que até a data desta defesa não entrou em operação (Figura 4).

Figura 3 - Placa indicativa da construção do centro de triagem.



Fonte: Arquivo pessoal.

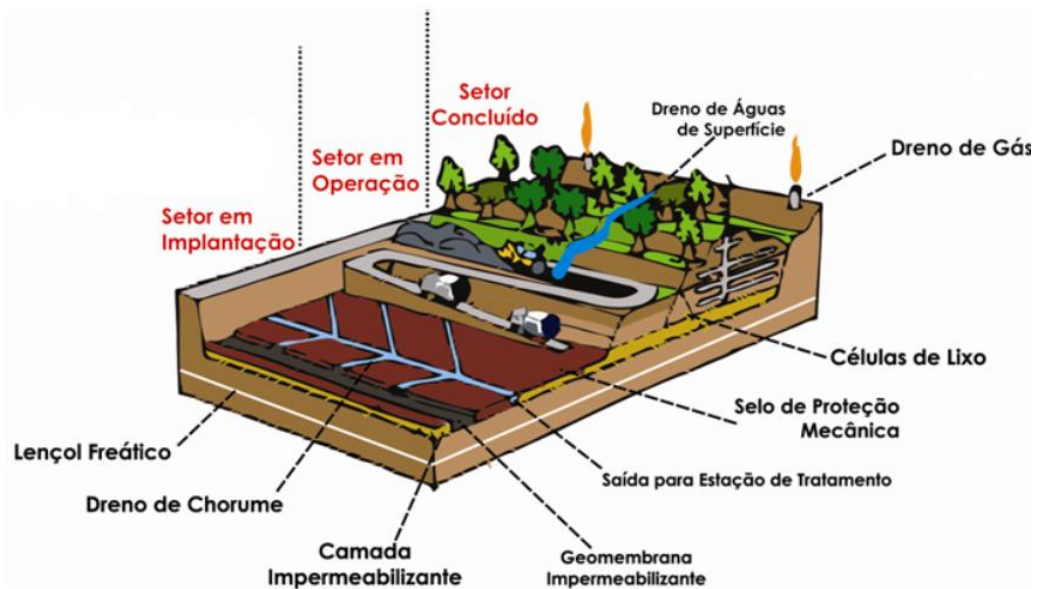
O principal objetivo deste estudo é a analisar a viabilidade da implantação de uma usina de aproveitamento do biogás para geração de energia no município de Rosana, gerenciando os resíduos sólidos urbanos de maneira a minimizar os impactos no meio ambiente. Além disso, busca-se demonstrar a viabilidade econômica do projeto.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aterro Sanitário

O Ministério do Meio Ambiente afirma que os aterros sanitários funcionam como grades reatores, nos quais há controle tanto da entrada dos resíduos quanto da saída do chorume e do biogás gerado durante o processo de decomposição (Brasil, [s.d.]). Conforme Lopes e Conde (2008), o termo bioreator é utilizado para se referir ao funcionamento dos aterros sanitários, detalhando o processo microbiológico envolvido na decomposição da matéria orgânica.

Figura 4 - Demonstração de como funciona aterro sanitário.



Fonte: (Resíduos sólidos – Alagoas, s.d.)

O funcionamento de um aterro sanitário, conforme ilustrado na Figura 2, ocorre de forma organizada por setores. O primeiro é o setor de implantação, onde são instaladas as camadas impermeabilizantes responsáveis por evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas; acima dessa camada ficam posicionados os drenos responsáveis pela coleta do chorume. Em seguida, o setor em operação, fase em que os resíduos são dispostos e compactados, iniciando-se o processo de decomposição orgânica e consequente produção de biogás, permitindo a captação do metano. A última fase corresponde ao setor concluído, que representa a cobertura final do aterro, podendo inclusive receber vegetação ou áreas reflorestadas.

Além disso, o sistema conta com drenagem de águas pluviais, destinada a evitar infiltrações indesejadas no maciço de resíduos, drenagem do gás gerado e com um selo de proteção mecânica, que reforça a estabilidade estrutural do aterro e garante maior segurança ambiental ao longo de sua operação.

O aterro sanitário Bandeirante, localizado em São Paulo, foi criado em 1979 recebeu aproximadamente 37 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo encerrado em 2007. Após o encerramento, iniciou-se a captação do biogás para geração de energia elétrica. Foram instalados 24 motogeradores, com uma capacidade de 925kW cada. No entanto, em 2023, apenas três motogeradores estavam funcionando. O aterro também participa da comercialização de créditos de carbono (Senechen, 2023).

Segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022), o município de Rosana possui 17.440 habitantes. No entanto, nem todos os moradores têm acesso à coleta regular de resíduos. Cerca de 83,84% da população é atendida pelo serviço municipal de coleta, com destinação ambientalmente adequada. Por outro lado, 13,48% dos moradores queimam o lixo gerado em suas propriedades (uma prática nociva tanto ao meio ambiente quanto à saúde pública). Além disso, 1,62% dos habitantes enterram seus resíduos, enquanto 0,7% realizam descarte inadequados, como em terrenos baldios, encostas, áreas públicas ou por outros meios não regulamentados (Instituto água e saneamento, 2023).

Porém Santos *et al.* (2018), com uma pesquisa sobre potencial energético e viabilidade econômica do uso combinado do biogás para geração de eletricidade na cidade de Itajubá (MG), dentre os cinco cenários o melhor foi combinado de biogás de aterro sanitário e estação de tratamento de esgoto, com um potencial de instalação de 685kW.

## 2.2 Biogás

O gás gerado através da decomposição dos resíduos sólidos urbanos é uma mistura de gases, intitulada de biogás, composto por metano (40-60%), dióxido de carbono (30-15%) e outros gases ( $H_2$ ,  $N_2$  e  $H_2S$ ) (Santos, 2011). O biogás possui diferentes finalidades, como: geração de energia elétrica e térmica, gás de cozinha, pode ser injetado na rede de gás natural entre outros. O tratamento necessário depende da forma de utilização do gás (Santos *et al.*, 2015).

As autoras Pavez e Azevedo (2020), destacam que o biogás é um combustível com poder calorífico equivalente ao gás natural, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica e mecânica.

Moravia (2010) afirma que o processo de degradação anaeróbia é um processo bioquímico composto por diversas reações, cada uma delas envolvendo populações específicas de bactéria. Os fatores que influenciam esse processo de biodegradação incluem: “granulometria, composição, densidade, umidade, peso específico e grau de compactação dos resíduos, aspectos quantitativos e qualitativos de nutrientes, temperatura e pH dos líquidos presentes no aterro”.

Santos, Barros e Tiago Filho (2015), propõem uma análise do aproveitamento energético dos resíduos, incluindo valores de eficiência dos materiais. Os autores destacam a necessidade de uma maior geração de resíduos sólidos para viabilizar economicamente a tecnologia. Essa implementação pode contribuir para o aumento de fontes renováveis, a descentralização da matriz energética e a redução na emissão de gases de efeito estufa. Considerando os aspectos econômicos, energéticos e ambientais, foram analisados cinco cenários, dos quais três foram considerados viáveis para o aproveitamento energético.

### *2.1.1 Geração de biogás em aterros*

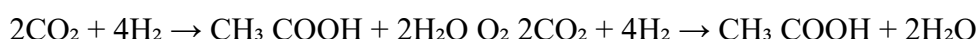
O processo de digestão anaeróbica é de natureza metabólica e requer condições sem a presença de oxigênio, dependendo da atividade dos microrganismos para transformar o resíduo em dióxido de carbono e metano. Esse processo é dividido em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

A hidrólise consiste na quebra de lipídios, polissacarídeos e proteínas em compostos orgânicos e solúveis, por meio de enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas. A velocidade dessa etapa é maior quando se trata de carboidratos e proteínas; no entanto, no caso de materiais como lignocelulose e lignina, o procedimento ocorre de forma mais lenta (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

Baseado em Costa, (2014) e Kunz; Steinmetz; Amaral (2022), a acidogênese são os organismos que trabalham em estado anaeróbico, convertendo o substrato da hidrolítica em ácidos de cadeia curta moléculas com 1 a 5 carbonos (são os ácidos graxos: ácido butírico, propiônico e acético). A pressão parcial do hidrogênio é o que controla a quantidade de carbono. Os carboidratos como glicose são degradados virando ácido láctico ou etanol por leveduras. No final da acidogênese formam cetonas, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio.

As bactérias acetogêneses são endotérmicas e atuam na degradação de compostos como o ácido propiônico, convertendo em acetato e dióxido de carbono. Nesta etapa, que a oxidação de compostos orgânicos ocorre, resultando na formação de metano. O meio aquoso tende a se tornar mais ácido com a formação de acetato, que também gera hidrogênio (H<sub>2</sub>), promovendo a diminuição do pH (Costa; Filho; Giordano, 2014).

A formação de ácido graxos de cadeia curta, sendo termodinamicamente estável, acontece em conjunto com a digestão do hidrogênio gasoso pelas arqueobactérias metanogênicas. A reação que apresenta acetogênese é (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022):



A última etapa da digestão anaeróbia é a metanogênese, onde o gás metano é gerado a partir de substâncias como ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, sendo esta uma reação exotérmica. As bactérias metanogênicas são divididas em dois grupos, acetoclásticas e hidrogenotróficas.

As acetoclásticas, que transformam acetato em metano, essa via é sensível ao pH e à elevada concentração de amônia. E as hidrogenotróficas que utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono como substrato de metano, sendo os principais reagentes o CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub> (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

Moravia (2010), apresenta as cinco fases do processo de estabilização de resíduos:

- Fase I – Aeróbia inicial, ocorre logo após o depósito dos resíduos e o contato com microrganismos aeróbios, iniciando a degradação da matéria orgânica.
- Fase II – Transição anaeróbia, os aceptores de elétrons passam de oxigênio para nitratos e sulfatos, até que o oxigênio é completamente substituído pelo dióxido de carbono. Ao final dessa fase, ocorre acúmulo de ácidos graxos voláteis no lixiviado.
- Fase III – Acidogênese: intensificação da hidrólise, resultando em alta concentração de ácidos graxos voláteis e redução significativa do pH, o que aumenta a solubilização de compostos inorgânicos e o consumo de nutrientes.
- Fase IV – Metanogênese, ocorre a fermentação dos ácidos intermediários pelas bactérias metanogênicas, gerando metano e dióxido de carbono. Nessa etapa, o pH tende a se estabilizar, os sulfatos e nitratos são convertidos em sulfeto e amônia, e metais são removidos do lixiviado por complexação e precipitação.

- Fase V – Maturação, os nutrientes disponíveis tornam-se limitantes, a atividade microbiológica reduz e, com o eventual retorno do oxigênio, a degradação torna-se mais lenta.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Dados do Município

O município de Rosana, localizado no interior do estado de São Paulo, foi selecionado como base de dados para a presente análise. Por ser uma cidade distante da capital acaba enfrentando dificuldade no acesso a serviços estruturados de gestão de resíduos, e a captação de investimentos. Por ser esta a cidade em que o Câmpus Unesp Rosana está inserido, teve-se o interesse em investigar se há viabilidade de aproveitamento dos resíduos para geração elétrica.

Na Tabela 1 encontram-se principais parâmetros utilizados nos cálculos de projeção populacional e geração de biogás.

Tabela 1 – Dados de população, modelos de projeção e produção de resíduos.

Cidade	População habitante (2020)			Capitação de resíduos em t.dia <sup>2</sup>	Modelo de projeção adotado	T (em °C <sup>3</sup> )	Precipitação (em mm.ano <sup>4</sup> )
	2019	2020	2022				
Rosana	16643	16281	17440	9.000,00	Modelo com taxa de crescimento populacional constante	29,6°C	1,35

Fonte: IBGE, (2022); Observatório Nacional dos Direitos à Água e ao Saneamento (Instituto água e saneamento, 2023)

#### 3.2 Cálculos de Geração de Biogás

Para se estimar a geração do biogás em um aterro, primeiramente deve-se realizar a projeção da população futura, considerando a vida útil do empreendimento. Em conversa com o então Secretário de Meio Ambiente, Amarildo, espera-se que o aterro funcione por mais 17 anos, este então foi o período de tempo adotado.

Para a estimativa da população futura, adotou-se o modelo de crescimento populacional com taxa constante (Qasin, 1999) (Equação1). De acordo com dados do IBGE (2022), a taxa de crescimento populacional do município é inferior a 1% ao ano, reflexo da ausência de eventos migratórios significativos. O modelo é representado por uma função exponencial, que pode ser expressa pela seguinte equação:

$$P_{trc} = P_0 \cdot (1 + r)^t \quad (1)$$

Em que:

$P_{trc}$  = população estimada pelo modelo com taxa de crescimento constante no ano  $t$ ;

$P_0$  = dados de população histórica relativos ao longo dos anos

$r$  = taxa de crescimento percentual média da cidade;

$t$  = ano atual;

Segundo o Observatório Nacional dos Direitos à Água e ao Saneamento (Instituto água e saneamento, 2023), a geração per capita diária no município de Rosana é de 1,42 kg/hab.dia. Com base nesse valor, a estimativa anual de geração per capita ( $I_{ger_t}$ ) corresponde a 0,5183 toneladas por habitante ao ano. Utilizando a equação 2, encontrou-se a estimativa da geração total de resíduos por ano (conforme sugerido por Barros, (2012); e Fernandes *et al.*, (2022)).

$$R_t = \frac{365 \times (I_{ger_t} \times P_t)}{1000} \quad (2)$$

Onde:

$R_t$  = geração de resíduos no  $t$  ano em ton;

$I_{ger_t}$  = capacidade de resíduos no ano  $t$  em kg.hab.dia;

$P_t$  = população no ano  $t$  em habitantes;

Adotando a metodologia proposta por Fernandes *et al.* (2022), para estimativa da produção de biogás, utilizando o software LandGEM® (USEPA, 2005), demonstrado na figura 5, habilitamos os dados de medições para inserção dos dados manual.

Figura 5 - Entradas dos dados no LandGEM®

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2024	743	817
2025	1.486	1.634
2026	2.229	2.452
2027	2.972	3.269
2028	3.715	4.086
2029	4.458	4.903
2030	5.201	5.721
2031	5.944	6.538
2032	6.686	7.355
2033	7.429	8.172
2034	8.172	8.990
2035	8.915	9.807
2036	9.658	10.624
2037	10.401	11.441
2038	11.144	12.259
2039	11.887	13.076
2040	12.630	13.893
2041		
2042		

Fonte: Arquivo pessoal.

O instrumento de medição entrega a quantidade gerada de metano, dióxido de carbono e oxigênio entre outros. O modelo é com base na Equação (3), a equação de primeira ordem (SOUZA *et al.*, 2019) estimando 17 anos de aterro. A constante da taxa de produção metano ( $k$ ) e o potencial de produção de metano ( $L_0$ ).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (3)$$

Em que:

$Q_{CH_4}$  = geração anual de CH<sub>4</sub> por ano em m<sup>3</sup>·ano;

$i$  = incremento de tempo de 1 ano;

$n$  = ano do cálculo – ano inicial de aceitação de resíduos;

$j$  = incremento de tempo de 0,1 ano;

$k$  = taxa de decaimento da geração de metano em 1/ano;

$L_0$  = potencial de geração de CH<sub>4</sub> em m<sup>3</sup>/ton;

$M_i$  = massa de resíduos aceita no  $i$ -ésimo ano em ton;

$t_{ij}$  = idade da  $j$ -ésima seção de massa residual aceita no  $i$ -ésimo ano.

As autoras evidenciaram que o decaimento da geração de metano por ano ( $k$ ) é amplamente discutido na literatura, devido à grande variação dos valores. No entanto, com base nos autores consultados, optou-se por determinar o valor de  $k$  em função da precipitação anual ( $P$ , em mm/ano), conforme metodologia apresentada por Krause *et al.* (2016). Quanto ao parâmetro  $L_0$ , foi adotado o valor médio de 170 m<sup>3</sup>/tonelada, conforme indicado nas literaturas de Zavarise (2021) e Fernandes *et al.* (2022).

$$k = 3,2 \times 10^{-5} \times P + 0,01 \quad (4)$$

Por meio da Equação 5, encontraremos o volume de gás efetivamente coletado, que considera a eficiência do sistema de captação. Em seguida, a potência elétrica através da equação 6, a partir do metano coletado e do poder calorífico do biogás. Esses parâmetros servem como base para o dimensionamento energético do sistema. Já a Equação 7 permite estimar a energia anual gerada, relacionando a potência instalada ( $P$ ) ao fator de capacidade ( $F_c$ ) e ao tempo de operação anual ( $t$ ), sendo a energia obtida expressa em MWh/ano.

$$Q_{coletado} = Q_{biogas} \times \eta_{coletado} \quad (5)$$

$$P = Q_{coletado} \times \eta \times PCI \times 3,1536 \cdot 10^{-7} \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$E = \frac{P \times F_c \times t}{1000} \quad (7)$$

Em que:

$Q_{coletado}$  = vazão coletada de biogás em cada ano, em m<sup>3</sup>·ano;

$\eta_{coletado}$  = eficiência de coleta, onde foi adotado o valor de 55,50% — média dos valores encontrados por Silva *et al.* (2013) e Watermolen *et al.* (2012);

$P$  = potência disponível em kW;

$\eta$  = rendimento da conversão energética = 0,33 (Companhia de tecnologia de saneamento ambiental, 2006);

$PCI$  = poder calorífico do biogás, de 22.106 J/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (Companhia de tecnologia de saneamento ambiental, 2006);

$3,1536 \cdot 10^{-7}$  = constante para conversão da vazão de m<sup>3</sup>/ano para m<sup>3</sup>/s;

$10^{-3}$  = constante para conversão da potência de W para kW;

$E$  = energia disponível anualmente, em MWh/ano;

$F_c$  = fator de capacidade, de 80%, conforme Santos *et al.* (2018);

$t$  = tempo de operação, em h/ano.

### 3.3 Análise da viabilidade econômica

Ainda com base em Fernandes *et al.* (2022), realizou-se a análise de viabilidade econômica (Equação 8) e o cálculo do custo da energia gerada (Equação 9). O Valor Presente Líquido (VPL) é uma análise econômica do projeto que indica se ele é financeiramente viável, mostrando o valor total dos lucros ou prejuízos ao longo do tempo.

Além disso, o Custo Nivelado de Energia (LCOE) foi utilizado para determinar a tarifa mínima necessária para a venda da energia gerada, proporcionando maior segurança na análise de viabilidade do empreendimento (Silva *et al.*, 2020).

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{(E_n T) - C_{om}}{(1+i)^n} - I \quad (8)$$

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^m \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum_{t=0}^m \frac{E_n}{(1+i)^n}} \quad (9)$$

Em que:

$E_n$  = energia produzida pela potência ótima no ano de análise;

$T$  = tarifa de venda de energia, em R\$/MWh;

$C_{om}$  = custo de operação e manutenção, em R\$/ano;

$i$  = taxa de juros, adotada como sendo igual a 15% ao ano;

$I$  = investimento inicial, em R\$;

$m$  = vida útil do projeto, em anos;

$n$  = ano de análise;

$C_n$  = custo associado ao empreendimento em cada ano.

Adotou-se o valor de tarifa de venda de energia de R\$292/MWh, que a ANEEL, (2019) identificou para usinas termoeletricas. Para a tarifa de venda de energia, seguimos a taxa Selic consideramos o valor de R\$ 15 % ao ano.

Em Nova Andradina, foram calculados os custos de operação de um aterro sanitário. Apesar de estar localizada em outro estado, a cidade encontra-se a 85,8 km de distância de Rosana e apresenta semelhanças nas condições climáticas, o que explica a adoção do custo da tonelada de resíduos sólidos urbanos. (Nova Andradina, 2020).

## 4 RESULTADOS

Para o desenvolvimento, buscou-se compreender como essas variações populacionais influenciam diretamente a geração de resíduos e a disponibilidade de metano ao longo do tempo. A partir dessa análise, foi possível estabelecer a relação entre a dinâmica demográfica e o comportamento da produção de biogás no aterro.

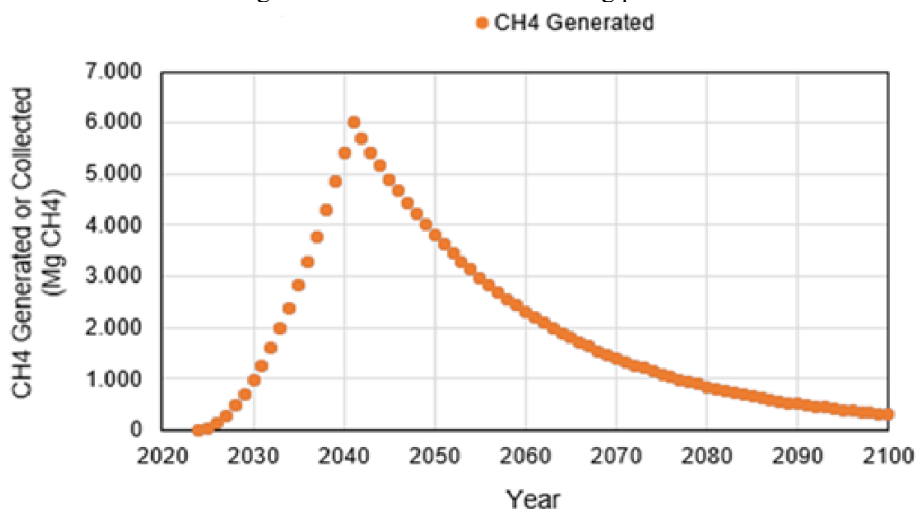
No entanto, os dados demográficos apresentados na Tabela 1 demonstram que a população não segue um padrão definido ao longo dos anos analisados. A projeção populacional foi mantida constante, com uma estimativa fixa de 17.440 habitantes, pois a taxa de crescimento utilizada no modelo foi considerada igual a zero.

Essas oscilações tornam inviável a aplicação adequada dos outros modelos de projeção populacional, uma vez que não foi possível identificar uma tendência consistente de crescimento, redução ou estabilidade. Dessa forma, não foi possível classificar o comportamento da população como crescente, decrescente ou constante.

Conforme o modelo de projeção populacional, estimou-se inicialmente a quantidade de resíduos gerados anualmente. Em seguida, esses dados foram inseridos no software LandGEM®, que forneceu as estimativas de produção de metano resultantes da decomposição dos RSU.

Na Figura 5, observa-se que o pico de produção de metano ocorre logo após o primeiro ano de encerramento da disposição de resíduos (18º ano). A partir desse ponto, a vazão entra em declínio, refletindo a produção residual de metano típica da fase pós-fechamento do aterro, quando a decomposição passa a ocorrer exclusivamente sobre os resíduos já depositados, sem a entrada de novos materiais.

Figura 6 - Vazão de metano em Mg por ano.

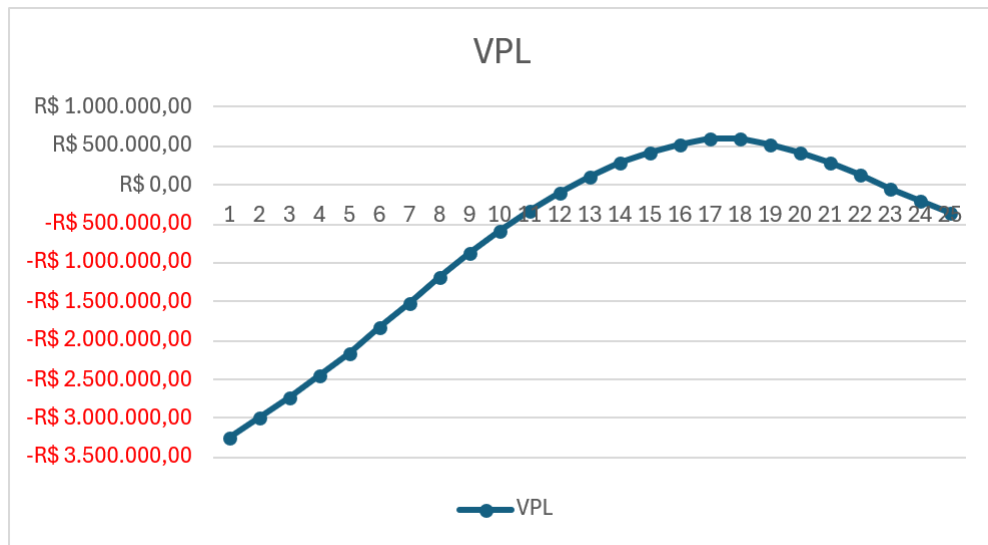


Fonte: Aatoria própria.

Considerando o comportamento da curva, em 2040 estima-se um montante acumulado de 153.665,58 toneladas de resíduos, resultando em uma coleta de metano de aproximadamente 5.994,01 m<sup>3</sup>/ano. Esse volume corresponde a uma potência instalada de 1.978,02 kW, evidenciando o potencial energético significativo associado à decomposição dos resíduos nesse período.

Os cálculos da viabilidade econômica utilizando como referência os custos operacionais anuais estimados pela Prefeitura Municipal de Nova Andradina (2025). Adotando um custo médio de R\$ 292,00 por tonelada de resíduo, estimou-se um custo operacional anual de R\$ 1.008.938,56 para Rosana. O custo de instalação do sistema foi calculado em R\$ 2.085.965,00.

Figura 7 - Valor Presente Líquido (VPL).



Fonte: Autoria própria.

A partir dessas estimativas, obteve-se que o Valor Presente Líquido (VPL) que apresenta retorno a partir do décimo primeiro ano de operação, conforme demonstrado na Figura 6, indicando a viabilidade econômica do projeto.

A análise realizada confirma a existência de um potencial de desenvolvimento regional que, embora não seja o mesmo desempenho de grandes centros urbanos como Campinas. Para potencializar esse avanço, torna-se fundamental o aprofundamento dos estudos, com foco na associação e integração dos municípios vizinhos, possibilitando a implementação de um sistema regionalizado de destinação de resíduos sólidos ambientalmente adequado, tecnicamente eficiente e padronizado.

O valor do Custo Nivelado de Energia (LCOE) encontrado foi de R\$81,007 por MWh. Conforme Fernandes *et al.* (2022), o “valor de LCOE para sistema de biogás implementado em aterro sanitário é da ordem de 30 % menores quando comparados aos valores das tecnologias de incineração e usina de digestão anaeróbia”.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que o descarte dos resíduos ocorra de forma ambientalmente correta (reduzindo a existência de lixões e de aterros controlados), torna-se necessário que o aterro sanitário seja ampliado e venha a substituir, gradualmente, os sistemas de disposição inadequados. Além disso, a possibilidade de aproveitamento energético do biogás gerado nos aterros sanitários torna-se um diferencial importante, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a eficiência energética do sistema.

Os aterros sanitários consorciados são vantajosos para diminuição de custos operacionais, gerando uma maior eficiência no tratamento e disposição final de resíduos. Considerando a geração de energia através de resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários é uma solução de aproveitamento energético, além de ser sustentável.

Sabemos que, para a construção de um aterro sanitário, é preciso analisar os impactos que essa obra pode gerar ao meio ambiente. Com isto, é importante ressaltar que, para a concretização deste projeto, deve-se verificar se, conforme o porte do aterro sanitário, se será necessário a elaboração de um EIA (Estudo de Impacto de Ambiental) e de um RIMA (Relatório de Impacto Ambiental), já que esses documentos são essenciais para avaliar e minimizar os possíveis impactos ambientais.

## 6 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou demonstrar a viabilidade econômica da implementação de um aterro sanitário no município de Rosana. Os resultados obtidos foram positivos, mesmo tratando-se de uma cidade com população relativamente reduzida. A análise comprovou que o projeto apresenta viabilidade econômica, o que reforça a sua relevância para a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos.

No trabalho demonstramos a implementação de uma usina a biogás, através de recuperação de gás de aterro, mesmo com os custos elevados, o projeto apresenta potencial significativo de retorno a longo prazo. A análise de VPL (Valor Presente Líquido), LCOE (Custo Nivelado de Energia) mostrou que o projeto é viável, principalmente em relação as leis do nosso país, e os benefícios ambientais.

Diante da crescente busca por fontes de energia sustentáveis e renováveis, o reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos apresenta-se como uma alternativa eficiente e ambientalmente adequada. Nesse contexto, o município de Rosana, por se tratar de uma cidade de pequeno, demonstrou potencial neste estudo.

Portanto, a implementação de sistemas de recuperação de biogás em aterros sanitários se apresenta como uma alternativa viável e vantajosa para municípios como Rosana, o aproveitamento energético desses resíduos, contribui tanto para a gestão sustentável dos resíduos quanto para a geração de energia renovável. E também para a diversificação da matriz energética e para o cumprimento das metas de sustentabilidade estabelecidas no cenário global.

## REFERÊNCIAS

ABRAGEL – Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa. Aprovado edital do leilão A-6 deste ano - [S. 1.], 22 set. 2023. Disponível em: <https://abragel.org.br/noticias-do-setor/aprovado-edital-do-leilao-a-6-deste-ano/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ABREMA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2023**. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 5 ago. 2024.

ABREMA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2024**. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 5 ago. 2024.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos . **Aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos**. Maceió: SEMARH-AL, [20--] Disponível em: <http://www.residuossolidos.al.gov.br/sistemas/aterro-sanitario>. Acesso em: 5 mar. 2025.

ALEXANDER, A.; BURKLIN, C. E.; SINGLETON, A. **Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide**. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2005.

ANDRADE, J. C. **Lixões, aterros controlados e aterros sanitários**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso técnico em Meio Ambiente) - Escola Técnica Estadual Professor Carmelino Corrêa Júnior, Franca, 2022. Disponível em: [https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/11350?locale=pt\\_BR](https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/11350?locale=pt_BR). Acesso em: 18 dez. 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa SELIC**: [online]. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 20 jul. 2025

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm). Acesso em: 14 maio 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuossolidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterrosanitario.html>. Acesso em: 11 ago. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **SINIR+**: Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos. 2019. Disponível em: <https://sinir.gov.br/paineis/destinacao/>. Acesso em: 24 jun. 2023

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** 2008. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/287bcc62-e752-453e-a3b6-cc3ca929d5a4>. Acesso em: 14 ago. 2023

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aterro: geração de biogás e uso energético: versão 1.0.** São Paulo: SMA: CETESB: MCT, v. 1, p. 1-2, 2006.

COSTA, E. S.; BARBOSA FILHO, O.; GIORDANO, G. Reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB): Uma abordagem concisa. **COAMB**, Rio de Janeiro, v. 5, p. 121, 2014.

FERNANDES, G. L.; SANTOS, I. F. S.; SILVA, H. L. C.; BARROS, R. M. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 27, n. 1, p. 67-77, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ZRswbT3dZ9ryJFWBGtmhXmr/?lang=pt>. Acesso em: 15 mar. 2023

IAS - INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO. **O saneamento em Rosana – SP: municípios e saneamento.** IAS, 2023. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-esaneamento/sp/rosana>. Acesso em: 20 ago. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades: Rosana – SP.** IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-eestados/sp/rosana.html>. Acesso em: 6 jun. 2024.

KRAUSE, M. J.; CHICKERIN, G. W.; TOWNSEND, M. G. Translating landfill methane generation parameters among first-order decay models. **Of the & Waste Management Association**, v. 66, p. 1084-1097, 2016. Disponível em: [https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2016.1200158#:~:text=k%20\(yr%E2%88%921\)%20describes,et%20al.%2C%202012](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2016.1200158#:~:text=k%20(yr%E2%88%921)%20describes,et%20al.%2C%202012)). Acesso em: 5 fer. 2024.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia, SC: [s. n.], 2019. 209 p. ISBN 978-85-93823-01-5.

LOPES, M. G. A.; CONDE, M. C. O Aterro sanitário como bio-reactor: Desafios geotécnicos. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, [S. l.], n. 114, p. 47-70, 8 nov. 2008. DOI [https://doi.org/10.14195/2184-8394\\_114](https://doi.org/10.14195/2184-8394_114). Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/issue/view/576/261>. Acesso em: 7 maio 2024.

MORAVIA, W. G. **Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas.** 2010. Tese (Pos-graduação em saneamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/c678a0fa-61a2-47a5-b2d8-b84fe1eab283/content>. Acesso em: 30 abr. 2024.

NOVA ANDRADINA. **Audiência pública discute destinação e tratamento do lixo em Nova Andradina.** Nova Andradina: Prefeitura Municipal de Nova Andradina, 2018.

Disponível em: <https://www.pmna.ms.gov.br/noticias/desenvolvimento-integrado/audiencia-publica-discutedestinacao-e-tratamento-do-lixo-em-nova-andradina>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PAVEZ, S. E. A.; AZEVEDO, C. G. Análise de viabilidade econômica de um sistema de biodigestão para resíduos sólidos urbanos no município de Rosana. **Simpósio de tecnologia Fatec**, Jaboticabal, p. 131-137, 30 out. 2020.

QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants**. Nova Iorque: [s. n.], 1999.

SANTOS, A. C. **Geração de metano devido à digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos – Estudo de caso do aterro sanitário metropolitano centro, Salvador – BA**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011. Disponível em: [https://ppec.ufba.br/files/2011\\_dissertacao\\_atila\\_meau\\_final.pdf](https://ppec.ufba.br/files/2011_dissertacao_atila_meau_final.pdf). Acesso em: 13 mar. 2024.

SANTOS, I. F. S. *et al.* Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1386-1394, 2020.

SANTOS, I. F.; BARROS, R. M.; VIEIRA, N.; TIAGO FILHO, G. L. Uso de biogás de aterros sanitários para geração de eletricidade: Um estudo dos custos de implantação. **The XI Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission-CLAGTEE**, [S. l.], p. 1-5, 16 nov. 2015.

SANTOS, I. F.; GONÇALVES, A. T. T.; BORGES, P. B.; BARROS, R. M.; LIMA, R. S. Utilização combinada de biogás proveniente de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto para geração de energia distribuída no Brasil. **Recursos, Conservação e Reciclagem**, [S. l.], v. 136, p. 376-388, 5 set. 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.01>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344918301861>. Acesso em: 4 dez. 2024.

SANTOS, I. F.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Uma avaliação energética, econômica e ambiental das opções de aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no Brasil. **REGET**, [S. l.], v. 19, p. 1344-1356, 21 maio 2015. DOI 105902/2236117016826. Disponível em: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/231163036.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2023.

SÃO PAULO (Estado). **Cadernos de educação ambiental: resíduos sólidos**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2014.

SENECHEN, M. G. **Análise da viabilidade de reinserção social urbana de aterro sanitário: uma revisão bibliográfica e estudo de caso**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Instituto de Ciência e Tecnologia, UNESP, Sorocaba, 2023.

SILVA, H. L. C.; CARVALHO, H. C.; PINTO, J.; NASCIMENTO, L. W.; SILVA, R. M. Gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos do Consórcio do Maciço de Baturité: Análise técnica e econômica da geração de biogás por aterro sanitário e usina de digestão anaeróbia. **Eng. Sanit. Ambient**, [S. l.], v. 26, p. 855-864, 8 set. 2021. DOI <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200155>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/esa/a/Zw5zg6WFMQXg6z4NqDmH5mk/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 17 out. 2024.

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N.; CANDIANI, G. Evaluation of surface emissions of gas from large landfills. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 18, p. 95-104, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/QjKnGWKRjYWLF4HqCzJhNLk/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 15 dez. 2023.

SOUZA, A. R. *et al.* Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG). **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 24, p. 887-896, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019187066>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/tyKR6PW6G4QYhqfLHhpZggs/?lang=pt>. Acesso em: 08 set. 2024.

WATERMOLEN, B. T. *et al.* Methane emission, oxidation and collection efficiency at a southeastern USA landfill. In: **Global waste management symposium**. North America Solid Waste, 2012.

ZAVARISE, J. P.; PIMASSONI, Y. S.; PINOTTI, L. M.; LEMOS, E. C. L. Emissões teóricas de biogás de aterro e seu aproveitamento energético no Brasil: um estudo bibliométrico. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 8, n. 1, p. 96–108, 2021. DOI: [10.21712/lajer.2021.v8.n1.p96-108](https://periodicos.ufes.br/lajer/article/view/35665/23615). Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/lajer/article/view/35665/23615>. Acesso em: 20 ago. 2024.