

ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE TERESINA-PI

Sandra Maria Borges Costa Alves - sandra.engenheira2015@gmail.com

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Processos industriais - Instituto Federal do Piauí

Aurilene Braga Ribeiro – aurilenesd@gmail.com

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e processos industriais - Instituto Federal do Piauí

Ênio Vieira Alves da Silva – alves.enios@ghotmail.com

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Processos industriais - Instituto Federal do Piauí

Laila Raila Leal Dias- lailaleal27@gmail.com

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Processos industriais - Instituto Federal do Piauí

Lucileide Aquino do Nascimento – lucileideaquino1980gmail.com

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Processos industriais– Instituto Federal do Piauí

Naiara de Oliveira Sobrinho - naiara20oliveira@gmail.com

Programa de Pós- Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais – PPGCM – Universidade Federal do Piauí

Resumo

O crescimento populacional e a expansão urbana intensificam a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), cuja gestão demanda soluções ambientalmente sustentáveis. Nesse contexto, o biogás gerado pela decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos em aterros sanitários constitui uma alternativa estratégica para mitigar emissões de gases de efeito estufa e diversificar a matriz energética por meio de uma fonte renovável. Este estudo visa estimar o potencial energético dos RSU em Teresina (PI). Para tanto, o crescimento populacional foi projetado pelo método logístico, utilizando dados censitários recentes do IBGE. A partir dessa projeção, associada à taxa de geração per capita e ao índice de cobertura de coleta da região Nordeste, foi estimada a geração de RSU no município. A produção de metano foi calculada pelo modelo do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que considera a decomposição da matéria orgânica, a constante de decaimento e o potencial de geração em função da massa de resíduos disposta. As projeções indicam que, de 2025 a 2035, a população passará de 883.782 para 902.041 habitantes, acumulando aproximadamente 2,87 milhões de toneladas de RSU. A geração máxima de metano está projetada para 2036, atingindo 9.020.690 m³/ano, dos quais 4.510.345 m³/ano poderão ser coletados. Nesse ano, a potência máxima disponível para conversão energética é de aproximadamente 0,72 MW, equivalente a 5.469



MWh/ano, enquanto a mínima corresponde a cerca de 623 MWh/ano em 2026. Esses dados evidenciam o potencial do biogás como instrumento de sustentabilidade urbana, inovação tecnológica e fortalecimento da economia circular.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, Biogás, Energia, Sustentabilidade.

Abstract

Population growth and urban expansion intensify the generation of municipal solid waste (MSW), the management of which requires environmentally sustainable solutions. In this context, biogas generated by the anaerobic decomposition of the organic fraction of waste in landfills constitutes a strategic alternative for mitigating greenhouse gas emissions and diversifying the energy matrix through a renewable source. This study aims to estimate the energy potential of MSW in Teresina, Piauí. To this end, population growth was projected using the logistic method, using recent census data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Based on this projection, combined with the per capita generation rate and the collection coverage index in the Northeast region, MSW generation in the municipality was estimated. Methane production was calculated using the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) model, which considers the decomposition of organic matter, the decay constant, and the generation potential based on the mass of waste disposed. Projections indicate that, from 2025 to 2035, the population will increase from 883,782 to 902,041 inhabitants, accumulating approximately 2.87 million tons of MSW. Peak methane generation is projected for 2036, reaching 9,020,690 m³/year, of which 4,510,345 m³/year can be collected. In that year, the maximum power available for energy conversion is approximately 0.72 MW, equivalent to 5,469 MWh/year, while the minimum corresponds to approximately 623 MWh/year in 2026. These data highlight the potential of biogas as an instrument for urban sustainability, technological innovation, and strengthening the circular economy.

Keywords: Urban solid waste, Biogas, Energy, Sustainability

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, aliado ao desenvolvimento econômico e à expansão da urbanização, tem provocado um rápido aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) (Zavarise et al., 2021). A gestão desses resíduos constitui um dos maiores desafios ambientais das sociedades contemporâneas. O avanço urbano, associado ao consumo crescente, intensifica a produção de RSU, exigindo soluções que integrem desenvolvimento urbano e sustentabilidade ambiental (Borges et al., 2025).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) estabelece que, após a aplicação dos tratamentos e destinações disponíveis aos resíduos sólidos urbanos (RSU), os resíduos remanescentes, denominados rejeitos, devem ser encaminhados para uma disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Nesse contexto, o aterro

sanitário, segundo a ABREMA (2023), configura-se como a instalação apropriada para essa finalidade, consistindo em uma obra de engenharia que engloba impermeabilização da base, gestão do biogás, drenagem, tratamento do chorume e monitoramento ambiental e geotécnico da área.

Os componentes orgânicos dos RSU destinados a aterros sanitários sofrem processos de degradação anaeróbia, resultando na formação de biogás (Boarati; Castro, 2023). O biogás de aterro, ou simplesmente biogás, é uma mistura gasosa produzida por meio da digestão anaeróbica da matéria orgânica. Nos aterros sanitários, essa decomposição resulta predominantemente na emissão de metano (CH_4), um gás com potencial de aquecimento global cerca de 21 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2), contribuindo significativamente para o efeito estufa (IPCC, 2006). Nesse contexto, o aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários configura-se como uma alternativa estratégica para reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE) e, simultaneamente, produzir uma fonte de energia limpa, renovável e ambientalmente adequada (Un, 2023).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), instituído pelo Decreto nº 11.043/2022, estabelece diretrizes e metas para a gestão sustentável de resíduos no Brasil, promovendo a economia circular e a redução de impactos ambientais. O presente estudo justifica-se pela necessidade de alternativas de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de Teresina-PI, considerando seu potencial para mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A relevância social, econômica e ambiental da pesquisa está em consonância com a agenda climática nacional e as estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas. Este estudo propõe estimar a geração de energia elétrica por meio do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de Teresina-PI, utilizando o modelo do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), considerando o elevado o volume de resíduos gerados no município.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CRESCIMENTO POPULACIONAL

Segundo o IBGE (2022), a população brasileira atingiu 203.062.512 habitantes, registrando crescimento de 6,5% em relação a 2010. No Piauí, o total foi de 3.269.200 habitantes, com variação de 4,81%, enquanto Teresina concentrou 866.300 habitantes, aumento de 6,39%, posicionando-se como maior município do estado, sexto do Nordeste e décimo nono do país. Segundo Costa, Dias e Robaina (2024), o crescimento populacional e fatores socioeconômicos impactam diretamente a geração de resíduos sólidos urbanos, exigindo estratégias de gestão mais eficazes.

2.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos são materiais nos estados sólido ou semissólido gerados por atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços ou de varrição urbana, passíveis de manejo, tratamento e disposição final. A acumulação de resíduos sólidos intensificou-se com a industrialização e a urbanização. O crescimento populacional elevou a demanda por produtos e a extração de recursos naturais, gerando resíduos frequentemente dispostos de forma inadequada (PLANARES, 2022).

Segundo a ABREMA (2024), em 2023, o índice de desemprego no Brasil apresentou redução, indicando aumento do poder de compra da população. Nesse contexto, estima-se que

a geração média de RSU per capita tenha sido de 1,047 kg/dia, totalizando cerca de 81 milhões de toneladas ao ano, equivalentes a mais de 221 mil toneladas diárias ou 382 kg por habitante anualmente. A região Sudeste manteve-se como a maior geradora, com 1,237 kg/hab./dia e aproximadamente 39,9 milhões de toneladas, cerca de 49,3% do total nacional. O Nordeste respondeu por 24,7%, com 20 milhões de toneladas anuais e produção per capita de 0,959 kg/hab./dia, evidenciando significativa participação na geração de RSU no país. O Sul apresentou a menor geração per capita, 0,779 kg/hab./dia, enquanto o Norte contribuiu com 7,5% do total nacional, aproximadamente 6 milhões de toneladas anuais.

2.3 BIOGÁS

O biogás é composto predominantemente por metano (40–60%) e dióxido de carbono (30–45%), apresentando ainda pequenas proporções de outros gases, como hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) (Da Silva et al., 2020b; Zavarise et al., (2021). Segundo Dantas; Chaves; Pires, (2021), o biogás constitui uma fonte de energia renovável, gerada a partir da decomposição de resíduos orgânicos por microrganismos, especialmente bactérias, que convertem o material em gases com potencial energético. O aproveitamento do biogás contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, em particular metano e dióxido de carbono, provenientes de aterros sanitários.

2.4 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

O metano (CH₄) é um gás de efeito estufa com elevado potencial de aquecimento global e alto poder calorífico inferior (PCI), o que permite seu uso na geração de energia térmica e elétrica. No Brasil, o setor de resíduos sólidos urbanos representa uma fonte significativa dessas emissões, tornando o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários uma estratégia eficiente para reduzir impactos ambientais e diversificar a matriz energética nacional (Nepomoceno; Pontarolo, 2022).

3 METODOLOGIA

3.1 ESTIMATIVA POPULACIONAL

A população de Teresina-PI foi estimada a partir dos censos do IBGE de 2000 e 2010 e de projeções para 2020 (IBGE, 2020), considerando um horizonte de 15 anos a partir de 2025 (2025–2035). Aplicou-se o modelo de crescimento logístico, conforme Von Sperling (2014), que requer dados de três populações em intervalos equidistantes, o que inviabilizou o uso dos dados do censo de 2022.

- **Modelo Logístico**

O modelo de crescimento logístico considera a capacidade de carga do ambiente, limitando o crescimento populacional a longo prazo. Inicialmente exponencial, o crescimento desacelera à medida que a população se aproxima da capacidade máxima, atingindo equilíbrio quando a taxa de natalidade iguala a de mortalidade. Para os cálculos, foram aplicadas as equações 1 a 5.

$$P_t = \frac{P_s}{1 + e^{-k(t - t_0)}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$P_s = \frac{2 * P_0 * P_1 * P_2 - P_1^2 * (P_0 + P_2)}{P_0 * P_2 - P_1^2} \quad (\text{Equação 2})$$

$$C = \frac{(P_s - P_0)}{P_0} \quad (\text{Equação 3})$$

$$K_l = \frac{1}{t_2 - t_1} * \ln \left[\frac{P_0 * (P_s - P_1)}{P_1 * (P_s - P_0)} \right] \quad (\text{Equação 4})$$

$$\frac{dP}{dT} = K_l * P * \left[\frac{(P_s - P)}{P_s} \right] \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

- dP/dT = Taxa de crescimento da população em função do tempo (hab./ano);
- P_t = População no ano “t” (hab.);
- P_0 = População no ano t_0 (ano mais antigo ou primeiro ano;) (hab.);
- P_1 = População no ano t_1 (ano intermediário) (hab.);
- P_2 = População no ano t_2 (ano atual) (hab.);
- P_s = População de saturação;
- C e K_l = Coeficientes de crescimento logístico;

Neste método, os parâmetros podem ser estimados por regressão não linear, desde que os dados observados sejam equidistantes no tempo e que: $P_0 < P_1 < P_2$ e $P_0 * P_2 < P_1^2$.

3.2 ESTIMATIVA DO VOLUME DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS

Para a projeção da geração diária de resíduos sólidos urbanos (RSU) em Teresina-PI, foram utilizados a taxa de geração per capita e o índice de coleta da Região Nordeste, conforme ABREMA (2024), juntamente com os dados populacionais do IBGE (2022). A quantidade de resíduos gerados foi estimada de acordo com a Equação 6.

$$M_r = P * G_p * C \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

- M_r = Massa de resíduos (kg/dia);
- P = População do município (hab.);
- G_p = Geração *per capita* (kg/hab./dia);
- C = Cobertura da coleta (%).

3.3 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE METANO

A produção de biogás a partir da decomposição de resíduos sólidos foi estimada pelo modelo desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), modelo matemático de primeira ordem. O método considera que a geração de metano depende da quantidade de carbono orgânico degradável (COD) presente nos resíduos sólidos dispostos no aterro, ou seja, o carbono que é suscetível à decomposição bioquímica. Para o cálculo da geração de metano foi utilizada a Equação 13.

$$GCH_4 = \sum x [(A * k * RSU_t(x) * RSU_f(x) * L_0) * e^{-k(t-x)}] \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

- GCH_4 = Geração de metano. (t de CH_4 /ano);
- $RSUt(x)$ = Total de resíduos gerados no município no ano x (t de RSU/ano);
- $RSUf(x)$ = Fração de resíduos depositado no aterro no ano x (100%);
- L_0 = Potencial de geração de metano (m^3/t de RSU x ano).
- A = Fator de normalização para correção da soma, equivalente a $(1 - e^{-k})/k$;
- k = Constante de decaimento (ano^{-1});
- x = Ano em que os resíduos foram depositados;
- t = Ano em que se está calculando a produção de biogás.

• Constante de decaimento

O valor da constante de decaimento (k) está relacionado ao tempo necessário para o carbono orgânico presente nos resíduos decair para metade de sua massa inicial, sendo sua determinação influenciada por fatores como a composição dos resíduos e as condições do aterro, incluindo umidade e temperatura. Na ausência de dados específicos do aterro, adota-se o valor padrão de 0,05, equivalente a uma meia-vida de aproximadamente 14 anos (IPCC, 2006), parâmetro utilizado nos cálculos desta pesquisa.

• Potencial de geração de Metano

O potencial de geração de metano (L_0) corresponde ao total produzido por massa de RSU (m^3 de metano por tonelada de RSU). Seu valor depende da composição gravimétrica dos resíduos sólidos. Para o cálculo deste parâmetro foi utilizada a Equação 8.

$$L_0 = MCF * COD * CODf * F * \frac{16}{12} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

- L_0 = Potencial de geração de metano do lixo (t de CH_4 /t de RSU);
- MCF = Fator de correção de metano (%);
- COD = Carbono orgânico degradável (t de C/t de RSU);
- $CODf$ = Fração de COD dissociada (%);
- F = Fração em volume de metano no biogás (%);
- $(16/12)$ = Fator de conversão de carbono em metano (t de CH_4 /t de C).

Além da constante de decaimento (k), os parâmetros FCM , COD , $CODf$ e F foram adotados conforme as recomendações do IPCC (1996; 2006). O fator de correção de metano (MCF) é determinado pelo nível de controle, tipo de disposição e gestão dos resíduos sólidos. Para aterros sanitários, adota-se MCF igual a 1. O carbono orgânico degradável (COD) representa a fração suscetível à decomposição bioquímica, sendo recomendado o valor de 12% quando não há informações específicas sobre a composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU). A fração dissociada do carbono orgânico degradável ($CODf$) indica a porção efetivamente disponível para degradação. Na ausência de dados sobre a temperatura da zona anaeróbia do aterro, recomenda-se o valor de 77% para $CODf$, conforme IPCC (2006), parâmetro utilizado neste estudo. A fração de metano presente no biogás está diretamente relacionada à composição dos resíduos, sendo, em média, de 50%, conforme recomendação do IPCC (2000; 2006) e adotada neste estudo.

3.4 PROJEÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS NO ATERRO

O cálculo da potência disponível, foi realizado por meio da equação 9, que expressa a relação entre a vazão de CH₄ gerado, a eficiência de coleta, seu poder calorífico interior (PCI) e a eficiência do grupo gerador. O poder calorífico inferior do biogás (50% de CH₄) adotado foi de 17,92 MJ/m³ CH₄ (CETESB, 2006). Também foi considerado um motor de combustão interna (ciclo OTTO) com eficiência total de conversão de 28% (Almeida; Barbosa; Mendonça, 2024).

$$P = GCH_4 * Ec * PCI * \eta * T^{-1} * 10^{-3} \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

- P= Potência disponível (kW);
- GCH₄ = Vazão de metano gerado (m³/ano);
- Ec = Eficiência de coleta (%);
- η = Eficiência do motor de combustão interna (%);
- PCI = Poder calorífico inferior do metano (J/m³ CH₄);
- T = $3,1536 \times 10^7$ = Constante de conversão da vazão de m³/ano para m³/s;
- 10^{-3} = Constante para conversão da potência de W para kW.

A energia disponível para o aterro sanitário foi calculada através da Equação 10 (IPCC, 1996; 2006), o rendimento adotado foi de 87 % (motores operando a plena carga), e o tempo de operação de 8760 horas/ano.

$$E = P * R * T * 10^{-3} \quad (\text{Equação 10})$$

Em que:

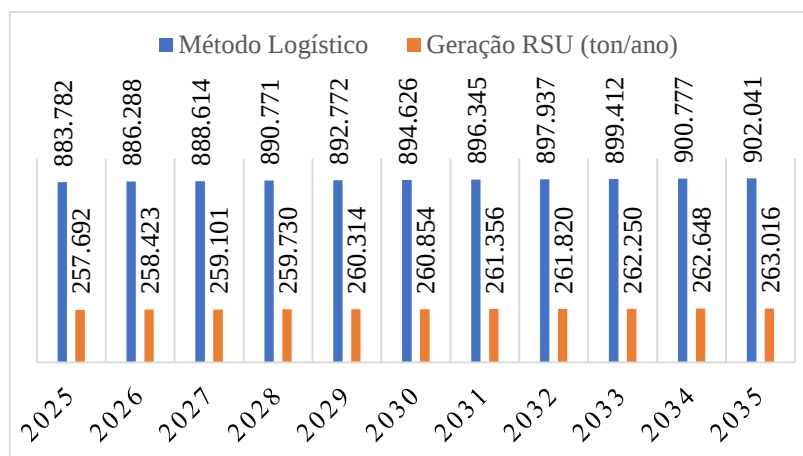
- E= Quantidade de energia (MWh/ano);
- P= Potência disponível (kW);
- R= Rendimento do motor;
- T_{ano}= Número total de horas em um ano (h);
- 10^{-3} = Constante para conversão da potência de kW para MW.

4 RESULTADOS

• Estimativa populacional e geração de resíduos sólidos urbanos

A projeção populacional de Teresina foi obtida pelo método logístico, com base nos dados do IBGE (2022). A estimativa da geração de resíduos, em função dessa projeção, considerou a taxa per capita e o índice de cobertura da coleta referentes à região Nordeste em 2023, conforme a ABREMA (2024). A Figura 1 evidencia a correlação entre o crescimento populacional e a produção de RSU no período de 2025 a 2035, oferecendo subsídios relevantes para o planejamento e a gestão sustentável.

Figura 1 – Gráfico da projeção populacional Teresina-PI.



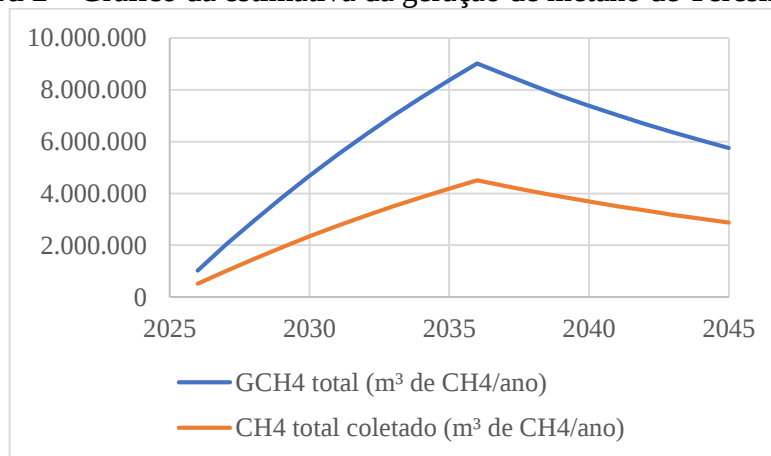
Fonte: Autoras (2024).

De acordo com o gráfico da Figura 1, de 2025 e 2035, a população projetada passará de 883.782 para 902.041 habitantes, elevando a geração anual de resíduos de 257.692 para 263.016 toneladas e acumulando 2.867.205 toneladas, o que demanda estratégias eficazes de gestão dos resíduos. A valorização energética desses resíduos, por meio da produção de biogás e eletricidade, configura medida estratégica para reduzir impactos ambientais, fortalecer a sustentabilidade urbana e impulsionar a economia circular.

• Geração de metano

O gráfico da Figura 2 mostra a geração total de metano e o metano coletado estimado para Teresina-PI, por meio da metodologia do IPCC (2006) para o período de 2025 a 2045. A projeção considera aporte de resíduos de 11 anos (2025–2035), dado o desconhecimento da vida útil do aterro, refletindo apenas o potencial de metano gerado no município.

Figura 2 – Gráfico da estimativa da geração de metano de Teresina (PI).



Fonte: Autoras (2025).

Em 2036, um ano após o encerramento do aporte de resíduos, projeta-se o pico de geração de metano no aterro de Teresina, com 9.020.690 m³/ano de GCH₄, dos quais 4.510.345

m³/ano serão coletados. O menor valor de coleta ocorre em 2026 (513.542 m³/ano). A partir de 2036, observa-se declínio contínuo, padrão típico de aterros sanitários pelo esgotamento da fração orgânica biodegradável. No que se refere à conversão energética, a potência máxima projetada para o ano de 2036 é de aproximadamente 2,6 MW, dos quais cerca de 0,72 MW correspondem à fração efetivamente disponível para conversão em energia elétrica. A menor potência elétrica disponível está estimada em 0,08 MW, no ano de 2026. O pico de geração de energia ocorre em 2036, com aproximadamente 5.469 MWh/ano, enquanto a geração mínima é projetada em torno de 623 MWh/ano. A análise indica que a geração média mensal de energia no período avaliado foi de 308,54 MWh, valor suficiente para atender integralmente ao consumo médio do aterro, estimado em 12.010 kWh/mês (SEMDUH, 2023). Considerando que cada residência na região Nordeste consome, em média, 136,2 kWh/mês (EPE, 2024), essa produção de energia seria capaz de abastecer aproximadamente 2.265 domicílios. Esses resultados evidenciam não apenas o potencial de aproveitamento energético do biogás durante o período de maior geração, mas também a necessidade de planejamento estratégico para a gestão do metano em fases posteriores, de modo a reduzir impactos ambientais.

5 CONCLUSÃO

O volume de resíduos estimados para Teresina apresenta elevado potencial de geração de metano, evidenciando a necessidade de aproveitamento energético do biogás como medida de mitigação ambiental, redução de gases de efeito estufa e diversificação da matriz energética.

A energia média mensal estimada seria suficiente para suprir a demanda mensal do aterro sanitário e, considerando o consumo médio residencial na região Nordeste, poderia abastecer 2.265 residências. No entanto, deve-se avaliar a viabilidade econômica e ambiental do aproveitamento do biogás para fins energéticos no aterro de Teresina-PI.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004c. 71 p.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Limpeza Urbana. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024*. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/12/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2024.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ALMEIDA, M. de J.; BARBOSA, T. A.; MENDONÇA, L. C. **Geração de crédito de carbono a partir de resíduos sólidos em Sergipe**. *Revista Cereus*, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 91-107, 10 fev. 2024. *Revista Cereus*. <http://dx.doi.org/10.18605/2175-7275/cereus.v16n1p91-107>.

BOARATI, S. R. S.; CASTRO, M. C. A. A. **Análise temporal da composição do biogás em aterro sanitário de porte médio**. *Natural Resources*, v.13, n.4, p.56-73, 2023. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2023.004.0004>.

BORGES, M. M. P.; TEIXEIRA, M. B.; MORAIS, W. A.; STIRLE, J. L.; RIBEIRO, I. L. **Aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. *Caderno Pedagógico*, Curitiba, v. 22, n. 7, 2025. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n7-063>.

BRASIL. **Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022**. Institui o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) e dispõe sobre diretrizes, estratégias, ações e metas para a gestão de resíduos sólidos no Brasil.



Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.043-de-13-de-abril-de-2022-396583616>. Acesso em: 27 ago. 2025.

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*, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 25 ago. 2025.

CETESB. **Manual do usuário do programa de computador Biogás e uso energético – aterros – versão 1.0.** Secretária do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia. São Paulo: SMA: CETESB: MCT, 2006

COSTA, I. M.; DIAS, M. F.; ROBAINA, M. **Avaliação da eficiência da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil por meio da análise envoltória de dados e variáveis de influência.** *Waste Disposal & Sustainable Energy*, v. 6, p. 283–295, jan. 2024. DOI: 10.1007/s42768-023-00175-x.

DANTAS, M. J. F.; CHAVES, J. W. R.; PIRES, R. O. R. Estimativa do potencial energético proveniente do biogás gerado em aterro sanitário no Ceará. *Revista Tecnologia*, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 1-12, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5020/23180730.2021.10777>.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2025. Rio de Janeiro: EPE, 2025.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 9 set. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: prévia da população dos municípios com base nos dados do Censo Demográfico 2022.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/22827-censo-demografico-2022.html?t=resultados>. Acesso em: 26 ago. 2025.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds).** 2006.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. **Revised 1996 IPCC. Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories.** Volume 6 – Waste. Chapter 3: Reference Manual. United Kingdom: IPCC, 1996.

NEPOMOCENO, T. A. R.; PONTAROLO, E. L. **Panorama brasileiro do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos para a geração de biogás em áreas de aterro sanitário.** *International Journal of Environmental Resilience Research and Science*, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 1–12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48075/ijerrs.v4i2.26408>

SPERLING, V. **Princípio do tratamento biológico de água residuais.** Introdução de qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Editora UFMG. v. (1). 4º ed. 472p.

UN, C. **A sustainable approach to the conversion of waste into energy: landfill gas-to-fuel technology.** *Sustainability*, v. 15, n. 20, p. 14782, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152014782>

VIEIRA, Larissa Cruz; CANDIANI, Giovano. **Potencial energético de resíduos sólidos urbanos na Região do Grande ABC Paulista.** *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 328-342, 16 fev. 2021. Companhia Brasileira de Produção Científica. <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2021.002.0030>.

ZAVARISE, Julio Pansiere et al. **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: <https://doi.org/10.21712/lajer.2021.v8.n1.p96-108>