

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO LUIZ RISSARDI

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL EM UM ATERRO
SANITÁRIO LOCALIZADO NO MUNICÍPIO DE JOINVILLE/SC

CURITIBA

2024

JOÃO LUIZ RISSARDI

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL EM UM ATERRO
SANITÁRIO LOCALIZADO NO MUNICÍPIO DE JOINVILLE/SC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista.

Orientador: Dr. Nicolas Lazzaretti Berhorst
Co-orientadora: Me. Flávia Aline Waydzik

CURITIBA

2024

RESUMO

Os aterros sanitários, geralmente associados a impactos socioambientais negativos, podem se tornar uma alternativa estratégica para a geração de energia limpa e renovável. Esse aproveitamento contribui para a diversificação e descarbonização da matriz energética. Este estudo estimou o potencial energético de um aterro sanitário em Joinville/SC. Para isso, foram realizadas projeções populacionais e de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), seguidas da modelagem da produção de biogás com o modelo LandGEM (versão 3.1). Com base no volume estimado de biogás, analisaram-se duas formas de aproveitamento: geração de energia elétrica e produção de hidrogênio verde. Os resultados indicaram que o aterro receberá cerca de 5,7 milhões de toneladas de RSU, atingindo um pico de produção anual de 68,1 milhões de m³ de biogás em 2046. Desse total, aproximadamente 40,9 milhões de m³ correspondem ao metano (CH₄), que poderá ser convertido em 91,9 GWh/ano de energia elétrica ou 100,5 milhões de m³ de hidrogênio verde. Esses dados reforçam o potencial do aproveitamento energético dos RSU como uma alternativa para ampliar a oferta de energias renováveis, impulsionar a economia de baixo carbono e promover a inovação tecnológica.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Biogás. Hidrogênio Verde. Energia Elétrica. Resíduos Sólidos Urbanos.

ABSTRACT

Sanitary landfills, often associated with negative socio-environmental impacts, can become a strategic alternative for generating clean and renewable energy. This utilization contributes to the diversification and decarbonization of the energy matrix. This study estimated the energy potential of a sanitary landfill in Joinville/SC. For this purpose, population and Municipal Solid Waste (MSW) generation projections were carried out, followed by biogas production modeling using the LandGEM model (version 3.1). Based on the estimated biogas volume, two utilization alternatives were analyzed: electricity generation and green hydrogen production. The results indicated that the landfill will receive approximately 5.7 million tons of MSW, reaching an annual biogas production peak of 68.1 million m³ in 2046. Of this total, approximately 40.9 million m³ corresponds to methane (CH₄), which could be converted into 91.9 GWh/year of electricity or 100.5 million m³ of green hydrogen. These findings reinforce the potential of MSW energy recovery as an alternative to expand the supply of renewable energy, drive a low-carbon economy, and promote technological innovation.

Keywords: Sanitary Landfill. Biogas. Green Hydrogen. Electric Energy. Municipal Solid Waste.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	5
1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
1.2.1 Resíduos Sólidos Urbanos	6
1.2.2 Aterro Sanitário	6
1.2.3 Biogás	7
1.2.4 Hidrogênio Verde	8
1.2.5 Acordos Globais	8
1.2.6 Políticas Públicas no Brasil	9
1.3 OBJETIVOS	9
1.3.1 Objetivo Geral	9
1.3.2 Objetivos Específicos	10
1.4 JUSTIFICATIVA	10
2 MATERIAIS E MÉTODOS	11
2.1 ÁREA DE ESTUDO	11
2.2 PROJEÇÃO POPULACIONAL E PRODUÇÃO DE RESÍDUOS	12
2.3 POTENCIAL DE BIOGÁS	13
2.4 POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA E DE HIDROGÊNIO VERDE	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
3.1 PROJEÇÃO POPULACIONAL E PRODUÇÃO DE RESÍDUOS	16
3.2 POTENCIAL DE BIOGÁS	16
3.3 POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA E DE HIDROGÊNIO VERDE	18
3.4 OUTRAS INICIATIVAS.....	19
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
REFERÊNCIAS.....	23
APÊNDICE A – MODELAGEM.....	27

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais da atualidade, impulsionando a necessidade de soluções sustentáveis para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Nesse contexto, as energias renováveis têm se destacado como alternativas para mitigar os impactos ambientais, diversificar a matriz energética e promover o desenvolvimento sustentável. A transição para fontes limpas e sustentáveis de energia é indispensável para atender às crescentes demandas energéticas e, ao mesmo tempo, cumprir metas globais, como as estabelecidas no Acordo de Paris.

A diversificação da matriz energética reduz a dependência de fontes fósseis e amplia o uso de tecnologias limpas. Embora fontes renováveis como hidrelétricas, energia solar e eólica já tenham uma presença significativa, ainda há espaço para integrar alternativas inovadoras, como o biogás e o hidrogênio verde. Nesse contexto, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) despontam como uma solução estratégica, pois são gerados em todas as áreas urbanas e apresentam um elevado potencial energético.

Os RSU, quando não gerenciados adequadamente, podem causar diversos problemas ambientais e sociais, como contaminação do solo e da água, emissão de GEE e geração de odores. Aterros sanitários, apesar de serem uma solução mais adequada do que lixões, ainda são frequentemente tratados como passivos ambientais. No entanto, com as tecnologias atuais, esses espaços podem ser transformados em ativos ambientais por meio do aproveitamento energético dos RSU depositados.

Nesse sentido, destaca-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), estabelecido pelo Protocolo de Quioto, que permite que países em desenvolvimento, como o Brasil, implementem projetos que resultem em redução de emissões de GEE, gerando créditos de carbono que podem ser comercializados no mercado internacional. Projetos de aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários estão alinhados aos objetivos do MDL, contribuindo tanto para a redução das emissões de GEE quanto para o fortalecimento do desenvolvimento econômico sustentável nas regiões onde são implementados.

O biogás, gerado pela decomposição da fração orgânica dos RSU em aterros sanitários, é um exemplo dessa transformação. Ele é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), gases que, se não forem controlados, contribuem para o aquecimento global. Além de ser utilizado na geração de energia elétrica, o biogás pode ser convertido em hidrogênio verde, uma fonte de energia limpa e de alta densidade energética. Essa abordagem está alinhada aos princípios da economia circular, que busca valorizar resíduos, reduzir desperdícios e mitigar impactos ambientais.

1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Resíduos que, em conformidade com o estabelecido na Resolução CONAMA 404, sejam provenientes de domicílios, serviços de limpeza urbana, pequenos estabelecimentos comerciais, industriais e de prestação de serviços, que estejam incluídos no serviço de coleta regular de resíduos e, que tenham características similares aos resíduos sólidos domiciliares (CONAMA, 2008).

De acordo com a ABRELPE (2021), a fração orgânica representa a maior parte dos RSU, correspondendo a 45,3% e incluindo sobras de alimentos, resíduos verdes e madeiras. Os materiais recicláveis secos somam 33,6%, sendo compostos principalmente por plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%) e embalagens multicamadas (1,4%). Outros resíduos correspondem a 21,1%, destacando-se os resíduos têxteis, couros e borrachas (5,6%), enquanto os rejeitos, majoritariamente resíduos sanitários, representam 15,5%.

Em 2022, o Brasil gerou aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU, com uma média de 1,04 kg por habitante ao dia. Deste total, 93% foram coletados, o que equivale a mais de 196 mil toneladas diárias. No entanto, apenas 61% dos resíduos coletados tiveram destinação ambientalmente adequada, sendo encaminhados para aterros sanitários, enquanto os 39% restantes foram destinados a locais inadequados, como lixões e aterros controlados (ABREMA, 2023).

1.2.2 Aterro Sanitário

O aterro sanitário pode ser definido como uma técnica de disposição de RSU no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 2010).

Diferentemente dos lixões, os aterros sanitários são construídos com sistemas de impermeabilização para evitar a contaminação do solo e da água subterrânea, além de possuírem mecanismos de drenagem de chorume e captação de gases. Os aterros sanitários funcionam como reatores biológicos, onde os resíduos e a água são as principais entradas, e os gases e o chorume, as principais saídas. Contudo, mesmo com essas medidas, os aterros ainda representam desafios, como a emissão de metano, um potente GEE, e a ocupação de grandes áreas de terreno e posterior recuperação ambiental (Piñas et al., 2016).

1.2.3 Biogás

O biogás pode ser definido como um combustível renovável gerado pela decomposição de matéria orgânica em ambientes sem oxigênio (anaeróbicos). Nesse processo, microorganismos decompõem a matéria orgânica, produzindo uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de conter traços de gases como amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). A composição do biogás em aterros sanitários pode variar ao longo do tempo, dependendo das condições do aterro e do tipo de resíduo depositado (Piñas et al., 2016).

A formação do biogás ocorre em duas etapas. Primeiro, na fase aeróbia, imediatamente após a disposição dos resíduos, a matéria orgânica é decomposta na presença de oxigênio por micro-organismos aeróbios, resultando em dióxido de carbono, água e calor. Em seguida, na fase anaeróbia, com o esgotamento do oxigênio, microorganismos anaeróbios assumem o processo, decompondo os compostos orgânicos por meio de etapas como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Durante a metanogênese, microorganismos metanogênicos convertem intermediários, como ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, em metano e dióxido de carbono (Zahaedi et al., 2013).

O metano presente no biogás pode ser utilizado para gerar energia elétrica, térmica ou como combustível veicular, oferecendo uma alternativa aos combustíveis fósseis tradicionais.

1.2.4 Hidrogênio Verde

O hidrogênio verde é um combustível sustentável produzido a partir de fontes de energia renováveis, como solar, eólica ou biomassa, resultando em emissões mínimas ou nulas de carbono durante sua produção. Uma das principais técnicas para a produção de hidrogênio verde é a reforma a vapor do biogás. Nesse processo, o biogás reage com vapor d'água em altas temperaturas (entre 700°C e 1.000°C) na presença de um catalisador, produzindo hidrogênio e monóxido de carbono. Tradicionalmente, esse método utiliza gás natural como fonte de metano; contudo, ao empregar biogás oriundo de resíduos orgânicos, torna-se uma alternativa mais sustentável e alinhada aos objetivos de descarbonização (Massulli, Mojtahed, 2023; Shah et al., 2016; Dictor et al., 2010).

1.2.5 Acordos Globais

O Protocolo de Quioto, adotado em 1997, foi um tratado internacional que estabeleceu metas de redução de emissões de GEE para países desenvolvidos, visando uma diminuição média de 5,2% em relação aos níveis de 1990, no período de 2008 a 2012. Para auxiliar no cumprimento dessas metas, criou-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), permitindo que nações desenvolvidas investissem em projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento, obtendo créditos de carbono em troca (SÃO PAULO, 2024).

Posteriormente, o Acordo de Paris, adotado em 2015, substituiu o Protocolo de Quioto, estabelecendo compromissos para todos os países, independentemente do seu nível de desenvolvimento, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais, preferencialmente a 1,5°C. Diferentemente do Protocolo de Quioto, o Acordo de Paris exige que cada nação apresente suas próprias metas de redução de emissões, conhecidas como Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), promovendo um esforço coletivo para combater as mudanças climáticas (SÃO PAULO, 2024).

1.2.6 Políticas Públicas no Brasil

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 de 2010 (Brasil, 2010), estabelece diretrizes, metas e ações para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos no país. Entre suas determinações, destaca-se a hierarquia de prioridades para a gestão de resíduos, que segue a seguinte ordem: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

No campo das energias renováveis, o Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, instituído pela Lei nº 14.948 de 2024, define diretrizes para impulsionar o desenvolvimento desse setor estratégico. A lei incentiva políticas específicas, criando condições favoráveis para investimentos em tecnologia, infraestrutura e capacitação, promovendo avanços em fontes de energia limpa (Brasil, 2024a).

Adicionalmente, a Lei nº 15.042 de 2024 regulamenta o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), alinhando o Brasil às metas do Acordo de Paris e introduzindo a precificação de carbono. O SBCE exige que organizações com emissões superiores a 10 mil toneladas de CO₂ equivalente elaborem inventários anuais de emissões, enquanto aquelas que superarem 25 mil toneladas devem cumprir metas de redução. Empresas menores podem participar voluntariamente do mercado, adquirindo créditos de carbono para compensar suas emissões residuais (Brasil, 2024b).

Essas políticas públicas reforçam o compromisso do Brasil com a sustentabilidade, promovem a transição para uma economia de baixo carbono e fortalecem a gestão integrada dos RSU.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial de geração de energia renovável de um aterro sanitário localizado no município de Joinville/SC.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a projeção populacional do município de Joinville e do volume de RSU que serão gerados;
- Determinar o volume de biogás que será produzido no aterro sanitário;
- Calcular o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás;
- Estimar o potencial de geração de hidrogênio verde por meio do processo de reforma a vapor do biogás.

1.4 JUSTIFICATIVA

Este trabalho é motivado pela crescente necessidade de diversificar a matriz energética brasileira e pelo potencial do aproveitamento energético dos RSU, um tema de grande relevância ambiental, social e econômica. Transformar passivos ambientais em ativos econômicos, como a produção de biogás para geração de energia elétrica ou hidrogênio verde em aterros sanitários, representa uma importante contribuição para a redução das emissões de GEE e para o avanço de soluções sustentáveis alinhadas aos princípios da economia circular.

Joinville, maior município do Estado de Santa Catarina e um dos mais importantes polos industriais do Brasil, ilustra bem essa necessidade. De acordo com o último censo do IBGE (2024), a cidade registrou um dos maiores crescimentos populacionais do país, o que intensifica tanto a geração de RSU quanto a demanda por energia elétrica. Esse cenário evidencia a necessidade de implementar alternativas sustentáveis para gerenciar os desafios decorrentes desse crescimento.

Por fim, os resultados deste trabalho podem oferecer subsídios para estudos de viabilidade, impulsiona a valorização econômica dos RSU, orientar políticas públicas, atrair investimentos em tecnologias limpas e estimular projetos no âmbito do MDL, promovendo o desenvolvimento sustentável e a inovação na região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Joinville (FIGURA 01), localizado no Estado de Santa Catarina, na região Sul do Brasil, é um importante polo industrial brasileiro, concentrando grande parte de sua atividade econômica nos setores metalmeccânico, têxtil, plástico, metalúrgico, químico e farmacêutico (Joinville, 2024a).

FIGURA 01 - LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE JOINVILLE.



Fonte: Adaptado de IAS (2024).

O município conta com um aterro sanitário que opera 24 horas por dia, recebendo RSU provenientes da coleta domiciliar, resíduos de limpeza urbana e resíduos de serviços de saúde, que passam por um processo de esterilização por autoclavagem antes de sua disposição final. Além de atender a demanda local, o aterro também recebe resíduos do município de Barra do Sul (Feldhaus et al., 2018).

Atualmente, o aterro sanitário é composto por cinco células (FIGURA 02): uma célula antiga, originalmente um lixão da década de 1980 que posteriormente foi transformado em aterro controlado e hoje encontra-se encerrado; duas células menores já encerradas; uma célula em operação (denominada área 1); e uma célula ainda não utilizada (denominada área 2), que atualmente serve como jazida (Feldhaus et al., 2018).

Este estudo visa estimar o potencial energético da área 2 do aterro sanitário, considerando sua ativação em 2025 e operação exclusiva para os RSU de Joinville até 2045.

FIGURA 02 – ATERRO SANITÁRIO DE JOINVILLE.



Fonte: Feldhaus et al. (2018).

2.2 PROJEÇÃO POPULACIONAL E PRODUÇÃO DE RESÍDUOS

No último censo, a população de Joinville era de 616.317 habitantes em 2022, e estimada em 654.888 habitantes em 2024. A taxa de crescimento populacional repetiu-se em 19,9% nos períodos de 2000 a 2010 e de 2010 a 2022, posicionando o município com o 13º maior crescimento populacional do Brasil (IBGE, 2024; Joinville, 2023a; Joinville, 2023b).

A projeção populacional foi estimada como base no modelo de crescimento populacional linear (ou aritmético) que considera que o comportamento da população em função do tempo segue uma tendência linear, sendo o crescimento da população constante a cada ano (Fernandes et al., 2022). A projeção foi realizada até o ano de 2045 (último ano que o aterro receberá os RSU). O modelo adotado é apresentado na EQUAÇÃO 01.

$$P = P_2 + \left(\frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \right) \cdot (t - t_2) \quad (01)$$

Onde:

P: população estimada no ano t;

P₁: população no ano t₁;

P₂: população no ano t₂;

t: ano de projeção;

t_1 : 2022;

t_2 : 2024.

De acordo com SINIS (2022) e IAS (2024), Joinville conta com 100% de cobertura na coleta de RSU, com uma taxa de geração de 0,75 kg por habitante por dia. A quantidade anual de RSU gerados foi calculada utilizando a EQUAÇÃO 02, considerando um acréscimo de 1% ao ano na taxa de produção de resíduos sólidos urbanos, conforme metodologia adotada por Piñas et al. (2016).

$$R_t = \frac{365 \cdot T_t \cdot P_t}{1.000} \quad (02)$$

Onde:

R_t : resíduos gerados em toneladas no ano t ;

T_t : taxa de geração de resíduos no ano t ;

P_t : população no ano t .

2.3 POTENCIAL DE BIOGÁS

O potencial de geração de biogás foi estimado utilizando o modelo LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*) – versão 3.1, um *software* desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) para calcular a produção de biogás em aterros sanitários (EPA, 2023), sendo recomendada no Brasil pela CETESB (2024) como uma metodologia confiável.

Amplamente empregado em estudos de viabilidade para aproveitamento energético, planejamento ambiental e conformidade regulatória, o modelo permite simulações com diferentes taxas de decomposição e características dos resíduos. Seu cálculo é baseado em uma equação de primeira ordem, conforme apresentado na EQUAÇÃO 03, sendo utilizado em diversos estudos (Santana et al., 2024; Oukili, Chhiba, 2023; Ramprasad, Anandhu, Abarna, 2023; Oukili, Mouloudi, Chhiba, 2022; Fernandes et al. 2020; Souza et al., 2019; Piñas et al., 2016).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \cdot \sum_{j=0,1}^1 \cdot k \cdot Lo \cdot \left(\frac{Mi}{10} \right) \cdot e^{-k \cdot t_{ij}} \quad (03)$$

Onde:

Q_{CH_4} = geração anual de CH_4 por ano em m^3 /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 geração de metano em ano⁻¹;

L_0 = potencial de geração de CH₄ em m³/toneladas;

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

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

O valor de k foi ajustado no modelo com base na EQUAÇÃO 04 a seguir, considerando exclusivamente a precipitação anual (em mm), conforme recomendado por Fernandes et al. (2022) para áreas tropicais . A cidade de Joinville apresenta uma precipitação média anual de 2.130 mm (Mello; Oliveira, 2016).

$$k = 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot P + 0,01 \quad (04)$$

Onde:

P: precipitação anual em mm.

O início das operações do aterro sanitário foi definido como 2025, com uma vida útil projetada de 20 anos, recebendo RSU até 2045. Para os cálculos, o modelo adotou L_0 igual a 170 m³ de CH₄ por tonelada de RSU e uma composição de 60% de metano no volume total do biogás gerado. Além disso, o modelo LandGEM estima as emissões do aterro ao longo de 140 anos.

2.4 POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA E DE HIDROGÊNIO VERDE

O biogás gerado no aterro sanitário pode ser utilizado tanto para a geração de energia elétrica quanto para a produção de hidrogênio verde por meio do processo de reforma a vapor.

De acordo com Santos (2000), 1 m³ de biogás é equivalente a 6,5 kWh de energia elétrica. No entanto, a eficiência dos sistemas de cogeração varia entre 30% e 38%, resultando em uma produção de energia efetiva entre 2,0 e 2,5 kWh por m³ de biogás, o que corrobora com os resultados obtidos por Coldebella et al. (2006). Para este estudo, adotou-se um fator de conversão de 2,25 kWh por m³ de biogás como referência.

Já o potencial de produção de hidrogênio verde foi estimado com base no processo de reforma a vapor do biometano. Conforme Gomes, Vieira e Nadaleti (2022), a taxa de conversão adotada é de 2,46 Nm³ de H₂ para cada Nm³ de CH₄, considerando uma perda de 3% durante a purificação do biogás e um fator de capacidade de 95%. Esses parâmetros foram utilizados como base para os cálculos deste estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROJEÇÃO POPULACIONAL E PRODUÇÃO DE RESÍDUOS

Na TABELA 01 é apresentada a projeção da geração de RSU em função do crescimento populacional de 2025 até 2045. Nesse período, o volume anual de RSU passará de 184.555 toneladas, em 2025, para 367.515 toneladas, em 2045, representando um crescimento de quase 100% em 20 anos. Como consequência, o volume acumulado de RSU destinados ao aterro sanitário alcançará aproximadamente 5,7 milhões de toneladas.

TABELA 01 – PROJEÇÃO POPULACIONAL E PRODUÇÃO DE RSU.

Ano	População	RSU (kg/hab/dia)	RSU (t)	RSU acumulado (t)
2025	674.174	0,75	184.555	184.555
2026	693.459	0,76	192.366	376.921
2027	712.745	0,77	200.317	577.237
2028	732.030	0,78	208.409	785.646
2029	751.316	0,79	216.642	1.002.288
2030	770.601	0,80	225.015	1.227.304
2031	789.887	0,81	233.530	1.460.834
2032	809.172	0,82	242.185	1.703.019
2033	828.458	0,83	250.981	1.954.000
2034	847.743	0,84	259.918	2.213.918
2035	867.029	0,85	268.996	2.482.914
2036	886.314	0,86	278.214	2.761.128
2037	905.600	0,87	287.573	3.048.701
2038	924.885	0,88	297.073	3.345.774
2039	944.171	0,89	306.714	3.652.487
2040	963.456	0,90	316.495	3.968.983
2041	982.742	0,91	326.418	4.295.400
2042	1.002.027	0,92	336.481	4.631.881
2043	1.021.313	0,93	346.685	4.978.566
2044	1.040.598	0,94	357.029	5.335.595
2045	1.059.884	0,95	367.515	5.703.109

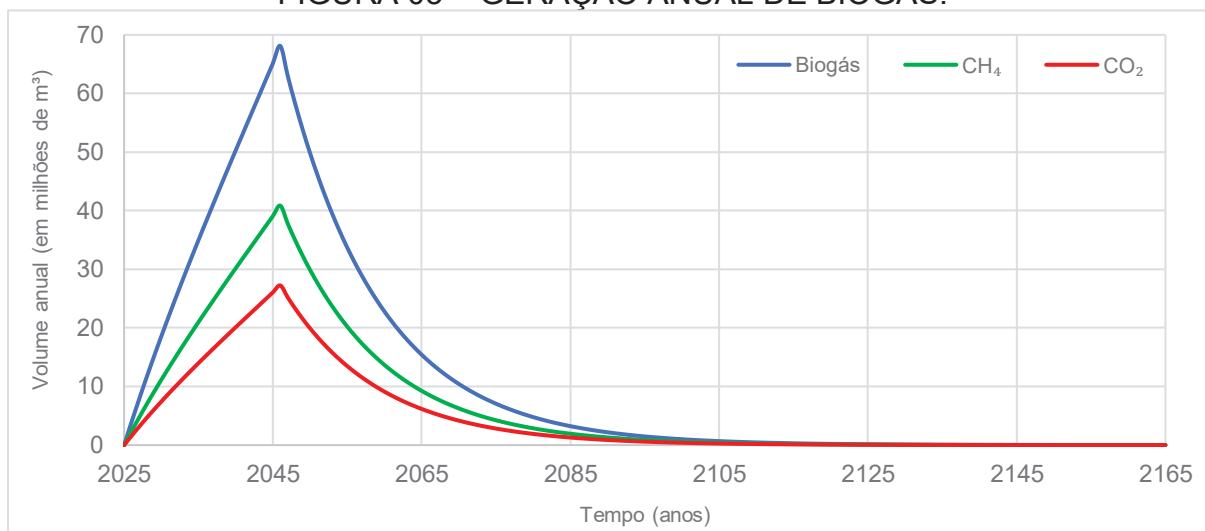
Fonte: O autor.

3.2 POTENCIAL DE BIOGÁS

Na FIGURA 03 é apresentada a geração anual (em milhões de m³) e na FIGURA 04 é ilustrada a geração acumulada (em bilhões de m³) do biogás e seus principais componentes: metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).

O modelo LandGEM considera que o RSU começa a gerar biogás no segundo ano após sua disposição. Dessa forma, o pico de emissões de biogás ocorreu em 2046, totalizando 68,1 milhões de m³, um ano após a última disposição de RSU no aterro sanitário estudado.

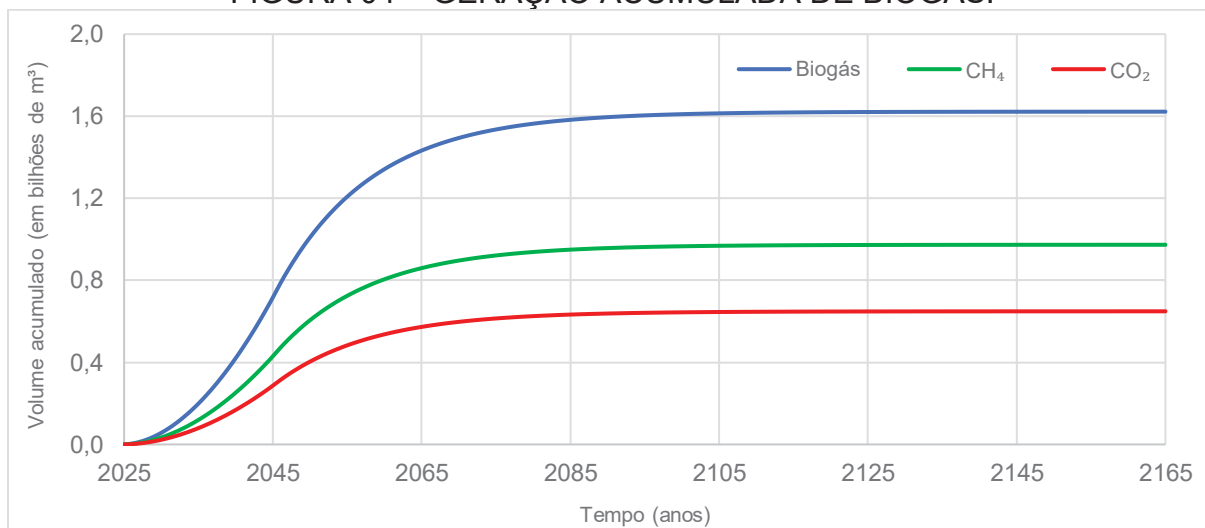
FIGURA 03 – GERAÇÃO ANUAL DE BIOGÁS.



Fonte: O autor.

Após o encerramento das atividades de recebimento de RSU, observa-se uma redução gradual na geração de biogás. Em 2065, 20 anos após a última disposição, o aterro ainda produzirá anualmente 15,4 milhões de m³ de biogás. Esse valor diminui para 3,2 milhões de m³ em 2085, após 40 anos. O metano e dióxido de carbono seguem essa mesma tendência. O metano atinge um pico de 40,9 milhões de m³, enquanto o dióxido de carbono alcança 27,2 milhões de m³, ambos no ano de 2046.

FIGURA 04 – GERAÇÃO ACUMULADA DE BIOGÁS.



Fonte: O autor.

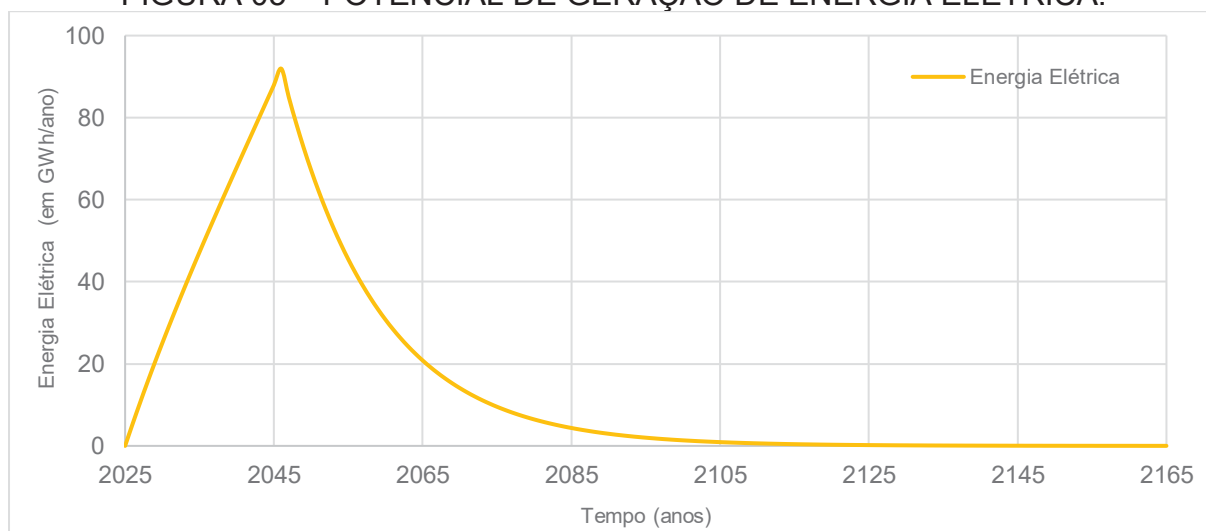
Observa-se que a geração acumulada de biogás começa a se estabilizar por volta de 2085, aproximadamente 40 anos após a última disposição de RSU. O modelo estimou que, ao longo de 140 anos, o aterro sanitário de Joinville produzirá um total de 1,6 bilhões de m³ de biogás, dos quais 0,9 bilhões de m³ serão de metano e 0,6 bilhões de m³ de dióxido de carbono. Os resultados anuais estão expostos no APÊNDICE A.

3.3 POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA E DE HIDROGÊNIO VERDE

Uma alternativa comum para o aproveitamento do biogás é sua conversão em energia elétrica. No aterro sanitário de Joinville, o biogás gerado tem potencial para 42,2 MWh/ano em 2035, 10 anos após o início da disposição de RSU. O pico de geração ocorre em 2046, atingindo 91,9 MWh/ano, seguido por uma redução para 20,8 MWh/ano em 2065 (20 anos após a última disposição de RSU) e para 4,4 MWh/ano em 2085, 40 anos após o encerramento das atividades de disposição.

O biogás gerado no aterro sanitário produzirá um total de 2,2 TWh de energia elétrica ao longo de 140 anos. O potencial de geração anual de energia elétrica é apresentado na FIGURA 05.

FIGURA 05 – POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.



Fonte: O autor.

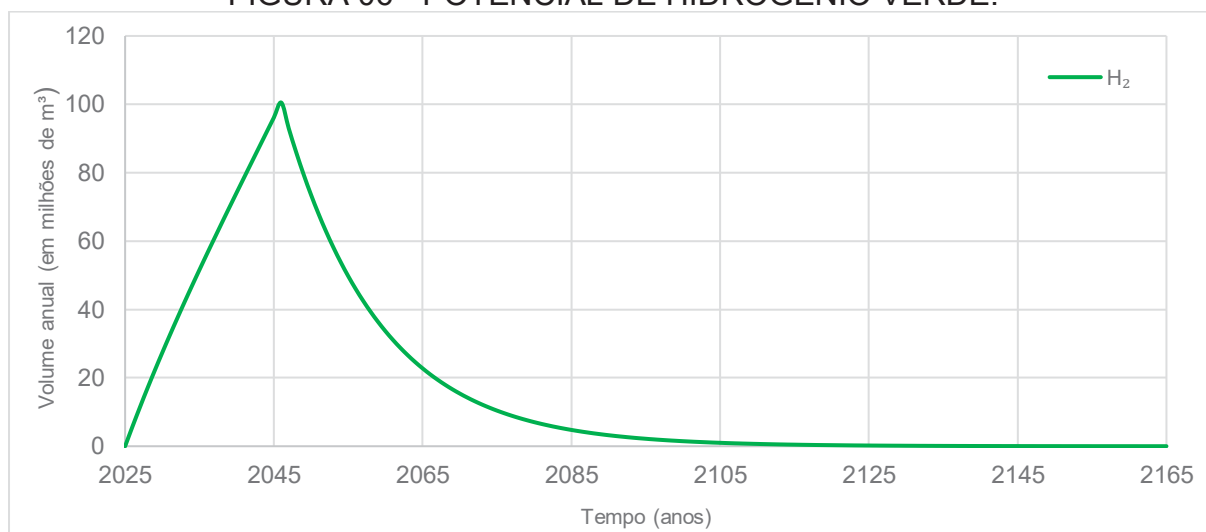
Outra alternativa para o aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Joinville é a produção de hidrogênio verde (H₂) por meio do processo de reforma

a vapor. Embora essa tecnologia ainda seja pouco explorada, apresenta um grande potencial, pois não gera emissões de carbono. O hidrogênio verde pode ser utilizado para abastecer veículos, indústrias e outras aplicações energéticas sustentáveis.

Além da conversão do biogás em energia elétrica, estima-se que, em 2035, seja possível gerar 51,6 milhões de m³ de hidrogênio verde a partir do biogás. O pico de produção ocorrerá em 2046, atingindo 100,5 milhões de m³, seguido por uma redução para 22,8 milhões de m³ em 2065 (20 anos após a última disposição de RSU) e para 4,8 milhões de m³ em 2085 (40 anos após o encerramento das atividades de disposição).

Ao longo de 140 anos, o biogás gerado no aterro terá o potencial de produzir um total de 2,4 bilhões de m³ de hidrogênio verde. O potencial de geração anual de hidrogênio verde está apresentado na FIGURA 06, e os resultados anuais estão expostos no APÊNDICE A.

FIGURA 06 - POTENCIAL DE HIDROGÊNIO VERDE.



Fonte: O autor.

3.4 OUTRAS INICIATIVAS

Os aterros sanitários possuem um grande potencial para a geração de energia renovável. A utilização do biogás, hidrogênio verde ou energia elétrica gerada a partir dos resíduos permite que municípios, como Joinville, utilizem essa energia para abastecer prédios públicos, frotas de veículos ou comercializá-la. O valor economizado pode ser reinvestido em diversas áreas do município, como saúde, educação e infraestrutura urbana, beneficiando diretamente a população. Além disso,

iniciativas como o Parque Bororós (FIGURA 07), já implementado no aterro de Joinville, promovem a conscientização ambiental da população, contribuindo para a valorização dos resíduos sólidos urbanos e incentivando práticas sustentáveis (Joinville, 2024b).

FIGURA 07 – PARQUE BORORÓS.



Fonte: Joinville (2024b).

Outra prática inovadora que pode ser adotada no aterro sanitário de Joinville é a instalação de placas fotovoltaicas, seguindo o exemplo bem-sucedido de Curitiba, que implantou a primeira usina solar em aterro sanitário da América Latina, no Aterro Caximba (FIGURA 08). Essa usina, conhecida como Pirâmide Solar, possui módulos fotovoltaicos instalados na área do aterro desativado, aproveitando o espaço anteriormente destinado à disposição de resíduos para a geração de energia limpa e renovável (CURITIBA, 2023).

FIGURA 08 – USINA SOLAR NO ATERRO CAXIMBA.



Fonte: Curitiba (2023).

A energia produzida é injetada na rede de distribuição da Companhia Paranaense de Energia Elétrica, permitindo que os créditos de energia sejam utilizados para reduzir os custos de eletricidade dos prédios públicos municipais. Como resultado, a prefeitura de Curitiba obteve uma economia estimada de 30% na conta de energia desses edifícios, o que representa, anualmente, aproximadamente R\$ 2,65 milhões em redução de despesas. Além do retorno financeiro, a iniciativa contribui para a descarbonização da matriz energética local, reforçando o compromisso da cidade com a sustentabilidade e a mitigação das mudanças climáticas (CURITIBA, 2023).

Outra alternativa interessante é a formação de consórcios municipais para a gestão de resíduos. O aterro de Piratininga, no interior de São Paulo, por exemplo, recebe RSU de quase 20 municípios da região (PIRATININGA, 2019). Isso gera um efeito de escala, reduzindo custos e facilitando a implementação de novas tecnologias. Além disso, a coleta seletiva pode otimizar ainda mais a operação dos aterros, destinando os resíduos recicláveis para associações e os resíduos orgânicos para compostagem. Essas iniciativas contribuem para aumentar a vida útil dos aterros e promover uma gestão de resíduos mais eficiente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo de estimar o potencial de geração de energia renovável no aterro sanitário de Joinville/SC foi alcançado. A projeção populacional indica que a população da cidade crescerá de aproximadamente 674 mil para cerca de 1 milhão de habitantes em 2045. Nesse período, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) quase dobrará, aumentando de 185 mil toneladas em 2025 para 368 mil toneladas anuais em 2045.

Ao longo de 20 anos, o aterro sanitário receberá cerca de 5,7 milhões de toneladas de RSU. Esse volume de resíduos promoverá um pico de produção anual de biogás em 2046, atingindo 68,1 milhões de m³. Deste total, aproximadamente 40,9 milhões de m³ correspondem a metano (CH₄), que poderá ser aproveitado para gerar 91,9 GWh/ano de energia elétrica ou, alternativamente, para produzir cerca de 100,5 milhões de m³ de hidrogênio verde.

Ao longo de 140 anos, período considerado no modelo LandGEM, o aterro sanitário de Joinville terá gerado, de forma acumulada, 1,6 bilhão de m³ de biogás, dos quais 0,9 bilhão de m³ será metano, 2,2 TWh de energia elétrica e 2,4 bilhões de m³ de hidrogênio verde. Esses resultados evidenciam a importância do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos como uma alternativa para a ampliação da oferta de energias renováveis.

Este trabalho constitui um estudo preliminar, fornecendo uma visão inicial sobre o potencial de aproveitamento energético do aterro sanitário analisado. Para uma avaliação mais precisa, recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados que considerem aspectos técnicos e financeiros. Tais estudos permitirão uma análise da viabilidade técnico-econômica da proposta apresentada, considerando fatores como custos de implantação, operação e manutenção, além da análise de mercado e regulamentações aplicáveis.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15849 – Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. Rio de Janeiro, 2010.

ABREAMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2023**. 2023.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2021**. Disponível em: <https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama-2021-ABRELPE.pdf> . Acesso em 15 fev. 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, 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024**. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. Diário Oficial da União, Brasília, 2 ago. 2024a.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Diário Oficial da União, Brasília, 12 dez. 2024b.

CETESB. **CETESB lança Procedimentos Técnicos para padronizar a produção de energia limpa em Aterros Sanitários no Estado de São Paulo**. 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2024/11/07/cetesb-lanca-procedimentos-tecnicos-para-padronizar-a-producao-de-energia-limpa-em-aterros-sanitarios-no-estado-de-sao-paulo/>. Acesso em 15 fev. 2025.

COLDEBELLA, *et al.* Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite. In: **Encontro De Energia No Meio Rural**, 6., 2006, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200053&lng=en&nrm=abn>. Acesso em 15 fev. 2025.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 404, de 11 de novembro de 2008**. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos.

CURITIBA. **Pirâmide Solar do Caximba transforma antigo aterro sanitário em gerador de energia limpa em Curitiba**. 2024. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/piramide-solar-do-caximba-transforma-antigo-aterro-sanitario-em-gerador-de-energia-limpa-em-curitiba/67889> . Acesso em 17. jan. 2025.

DICTOR, M. et al. Electro-stimulated biological production of hydrogen from municipal solid waste. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 10682-10692, 2010.

EPA. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)**. 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/land-research/landfill-gas-emissions-model-landgem>. Acesso em 15 dez. 2024.

FELDHAUS, C. R. et al. Estudo Matemático Computacional da Geração de Percolado do Aterro Sanitário de Joinville. In: **XIV Simpósios Ítalo-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2018.

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. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vol. 27, N. 1, 67-77, 2022.

GOMES, J. P.; VIEIRA, B. M.; NADALETI, W. C. Produção de hidrogênio verde nos aterros sanitários gaúchos: Uma análise técnica e econômica. In: **8ª Semana Integrada**. Universidade Federal de Pelotas – UFPEL. 2022.

HARO, K. et al. Assessment of the carbon footprint of a NonHazardous Waste Storage Facility (NWISH): Case of the waste treatment and recovery center (CTVD) in Polesgo (Ouagadougou). 2019.

IAS - INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO. **Joinville (SC)**. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/sc/joinville> . Acesso em 15 jan. 2025.

IBGE. **Joinville**. 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/joinville/p-anorama> . Acesso em 15 dez. 2024.

JOINVILLE. **Censo 2022 aponta que Joinville tem 616.323 moradores**. 2023a. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/noticias/censo-2022-aponta-que-joinville-tem-616-323-moradores/> . Acesso em 15 dez. 2024.

JOINVILLE. **Cidade em Dados - 2024. 2024a**. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/publicacoes/joinville-cidade-em-dados-2024/> . Acesso em 17 jan. 2025.

JOINVILLE. **IBGE apresenta dados preliminares do Censo 2022 em Joinville**. 2023b. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/noticias/ibge-apresenta-dados-preliminares-do-censo-2022-em-joinville/>. Acesso em 15 dez. 2024.

JOINVILLE. **Parque de Educação Ambiental Bororós**. 2024b. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/servicos/agendar-visita-ao-parque-de-educacao-ambiental-bororos/> . Acesso 17. jan. 2025.

MASSULLI, A. R.; MOJTAHED, A. A potential coupling of reforming and electrolysis for producing renewable hydrogen from landfill gas. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2648, 2023.

MELLO, Y.; OLIVEIRA, T. M. N. Análise Estatística e Geoestatística da Precipitação Média para o Município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**. Vol. 31, n. 2, 229-239. 2016.

OUKILI, A. I.; CHHIBA, M. Evaluation of the Energy Capacity of the Controlled Landfill from Mohamedia Benslimane by Three Theoretical Methods – Land Gem, IPCC, and TNO. **Journal of Ecological Engineering**, 24(2), 19–30. 2023.

OUKILI, A. I.; MOULOUDI, A.; CHHIBA, M. LandGEM Biogas Estimation, Energy Potential and Carbon Footprint Assessments of a Controlled Landfill Site. Case of the Controlled Landfill of Mohammedia-Benslimane, Morocco. **Journal of Ecological Engineering**. 2022, 23(3), 116–129. 2022.

PIÑAS, J. A. V. et al. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (CETESB). **Revista Brasileira de Estudos de População**. Rio de Janeiro, v.33, n.1, p.175-188, jan./abr. 2016.

PIRATININGA. **COMDEMA de Piratininga realiza visita ao Aterro Sanitário terceirizado presente no município**. 2019. Disponível em: <https://piratininga.sp.gov.br/public/index.php/noticia/2300/comdema-de-piratininga-realiza-visita-ao-aterro-sanitario-terceirizado-presente-no-municipio/> . Acesso em 15 fev. 2025.

RAMPRASAD, C.; ANANDHU, A.; ABARNA, A. Quantification of Methane Emissions Rate Using LandGEM Model and Estimating the Hydrogen Production Potential from Municipal Solid Waste Landfill Site. **Nature Environment and Pollution Technology**. Vol. 22, N. 4, 2023.

SÃO PAULO. **O que foi o Protocolo de Quioto e o que é o Acordo de Paris?** 2024. Disponível em: https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/o-que-foi-o-protocolo-de-quioto-e-o-que-e-o-acordo-de-paris/?utm_source=chatgpt.com . Acesso em 15 fev. 2025.

SANTANA, M. S. A. et al. Mathematical modeling of the estimate of methane gas generation, of the organic fraction of MSW from the agreste alagoano sanitary landfill, from standard data and experimental data. **Revista de Gestão Social e Ambiental**. v. 18. n. 3. 2024.

SANTOS, P. **Guia Técnico de Biogás**. CCE - Centro para a Conservação de Energia, Portugal, 2000.

SHAH, A. et al. Bacillus sp. strains to produce bio-hydrogen from the organic fraction of municipal solid waste. **Applied Energy**, v. 176, p. 116-124, 2016.

SINIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnósticos SNIS**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis> . Acesso em 15 dez. 2024.

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). **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n.5, p. 887-896, 2019.

ZAHAEDI, S. et al. Hydrogen production from the organic fraction of municipal solid waste in anaerobic thermophilic acidogenesis. **Bioresource Technology**, v. 129, p. 85-91, 2013.

APÊNDICE A – MODELAGEM

TABELA 02 – RESULTADOS ANUAIS DA MODELAGEM.

Ano	Biogás (m³/ano)	CH ₄ (m³/ano)	CO ₂ (m³/ano)	H ₂ V (m³/ano)	Energia Elétrica (kWh/ano)
2025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2026	3.946.775,797	2.368.065,478	1.578.710,319	5.825.441,076	5.328.147,326
2027	7.763.850,004	4.658.310,003	3.105.540,002	11.459.442,606	10.481.197,506
2028	11.463.984,769	6.878.390,862	4.585.593,908	16.920.841,520	15.476.379,439
2029	15.058.982,736	9.035.389,641	6.023.593,094	22.227.058,518	20.329.626,693
2030	18.559.759,182	11.135.855,509	7.423.903,673	27.394.204,552	25.055.674,895
2031	21.976.408,737	13.185.845,242	8.790.563,495	32.437.179,296	29.668.151,795
2032	25.318.267,080	15.190.960,248	10.127.306,832	37.369.762,210	34.179.660,558
2033	28.593.968,001	17.156.380,801	11.437.587,201	42.204.696,770	38.601.856,802
2034	31.811.496,171	19.086.897,703	12.724.598,468	46.953.768,348	42.945.519,831
2035	34.978.235,943	20.986.941,566	13.991.294,377	51.627.876,253	47.220.618,524
2036	38.101.016,492	22.860.609,895	15.240.406,597	56.237.100,342	51.436.372,264
2037	41.186.153,547	24.711.692,128	16.474.461,419	60.790.762,635	55.601.307,288
2038	44.239.488,000	26.543.692,800	17.695.795,200	65.297.484,288	59.723.308,800
2039	47.266.421,606	28.359.852,963	18.906.568,642	69.765.238,290	63.809.669,168
2040	50.271.949,993	30.163.169,996	20.108.779,997	74.201.398,189	67.867.132,490
2041	53.260.693,202	31.956.415,921	21.304.277,281	78.612.783,166	71.901.935,823
2042	56.236.923,924	33.742.154,354	22.494.769,569	83.005.699,711	75.919.847,297
2043	59.204.593,611	35.522.756,167	23.681.837,444	87.385.980,170	79.926.201,375
2044	62.167.356,633	37.300.413,980	24.866.942,653	91.759.018,391	83.925.931,455
2045	65.128.592,612	39.077.155,567	26.051.437,045	96.129.802,695	87.923.600,026
2046	68.091.427,075	40.854.856,245	27.236.570,830	100.502.946,363	91.923.426,551
2047	62.972.071,459	37.783.242,876	25.188.828,584	92.946.777,474	85.012.296,470
2048	58.237.607,203	34.942.564,322	23.295.042,881	85.958.708,232	78.620.769,724
2049	53.859.096,805	32.315.458,083	21.543.638,722	79.496.026,884	72.709.780,687
2050	49.809.778,388	29.885.867,033	19.923.911,355	73.519.232,901	67.243.200,824
2051	46.064.902,129	27.638.941,277	18.425.960,852	67.991.795,543	62.187.617,874
2052	42.601.578,984	25.560.947,390	17.040.631,593	62.879.930,580	57.512.131,628
2053	39.398.640,788	23.639.184,473	15.759.456,315	58.152.393,803	53.188.165,063
2054	36.436.510,875	21.861.906,525	14.574.604,350	53.780.290,051	49.189.289,681
2055	33.697.084,421	20.218.250,653	13.478.833,769	49.736.896,606	45.491.063,969
2056	31.163.617,790	18.698.170,674	12.465.447,116	45.997.499,859	42.070.884,017
2057	28.820.626,189	17.292.375,714	11.528.250,476	42.539.244,255	38.907.845,356
2058	26.653.789,028	15.992.273,417	10.661.515,611	39.340.992,606	35.982.615,188
2059	24.649.862,390	14.789.917,434	9.859.944,956	36.383.196,888	33.277.314,227
2060	22.796.598,083	13.677.958,850	9.118.639,233	33.647.778,770	30.775.407,412
2061	21.082.668,776	12.649.601,266	8.433.067,510	31.118.019,113	28.461.602,847
2062	19.497.598,769	11.698.559,261	7.799.039,508	28.778.455,783	26.321.758,338
2063	18.031.699,961	10.819.019,977	7.212.679,985	26.614.789,143	24.342.794,948
2064	16.676.012,639	10.005.607,583	6.670.405,056	24.613.794,655	22.512.617,063
2065	15.422.250,710	9.253.350,426	6.168.900,284	22.763.242,048	20.820.038,459
2066	14.262.751,061	8.557.650,637	5.705.100,425	21.051.820,567	19.254.713,933
2067	13.190.426,719	7.914.256,032	5.276.170,688	19.469.069,838	17.807.076,071
2068	12.198.723,534	7.319.234,121	4.879.489,414	18.005.315,937	16.468.276,771
2069	11.281.580,121	6.768.948,073	4.512.632,049	16.651.612,259	15.230.133,164
2070	10.433.390,811	6.260.034,487	4.173.356,325	15.399.684,837	14.085.077,595

Ano	Biogás (m³/ano)	CH ₄ (m³/ano)	CO ₂ (m³/ano)	H ₂ V (m³/ano)	Energia Elétrica (kWh/ano)
2071	9.648.971,390	5.789.382,834	3.859.588,556	14.241.881,771	13.026.111,376
2072	8.923.527,410	5.354.116,446	3.569.410,964	13.171.126,457	12.046.762,003
2073	8.252.624,888	4.951.574,933	3.301.049,955	12.180.874,334	11.141.043,598
2074	7.632.163,203	4.579.297,922	3.052.865,281	11.265.072,887	10.303.420,324
2075	7.058.350,034	4.235.010,020	2.823.340,014	10.418.124,650	9.528.772,546
2076	6.527.678,179	3.916.606,908	2.611.071,272	9.634.852,993	8.812.365,542
2077	6.036.904,122	3.622.142,473	2.414.761,649	8.910.470,484	8.149.820,564
2078	5.583.028,203	3.349.816,922	2.233.211,281	8.240.549,628	7.537.088,074
2079	5.163.276,290	3.097.965,774	2.065.310,516	7.620.995,804	6.970.422,992
2080	4.775.082,818	2.865.049,691	1.910.033,127	7.048.022,240	6.446.361,805
2081	4.416.075,112	2.649.645,067	1.766.430,045	6.518.126,866	5.961.701,401
2082	4.084.058,882	2.450.435,329	1.633.623,553	6.028.070,910	5.513.479,491
2083	3.777.004,813	2.266.202,888	1.510.801,925	5.574.859,103	5.098.956,497
2084	3.493.036,160	2.095.821,696	1.397.214,464	5.155.721,372	4.715.598,816
2085	3.230.417,281	1.938.250,368	1.292.166,912	4.768.095,906	4.361.063,329
2086	2.987.543,022	1.792.525,813	1.195.017,209	4.409.613,501	4.033.183,080
2087	2.762.928,914	1.657.757,349	1.105.171,566	4.078.083,078	3.729.954,034
2088	2.555.202,094	1.533.121,256	1.022.080,838	3.771.478,291	3.449.522,827
2089	2.363.092,914	1.417.855,749	945.237,166	3.487.925,142	3.190.175,434
2090	2.185.427,186	1.311.256,312	874.170,874	3.225.690,527	2.950.326,701
2091	2.021.118,999	1.212.671,399	808.447,600	2.983.171,643	2.728.510,649
2092	1.869.164,086	1.121.498,451	747.665,634	2.758.886,190	2.523.371,516
2093	1.728.633,683	1.037.180,210	691.453,473	2.551.463,316	2.333.655,472
2094	1.598.668,856	959.201,314	639.467,542	2.359.635,231	2.158.202,956
2095	1.478.475,247	887.085,148	591.390,099	2.182.229,464	1.995.941,583
2096	1.367.318,220	820.390,932	546.927,288	2.018.161,693	1.845.879,597
2097	1.264.518,374	758.711,025	505.807,350	1.866.429,121	1.707.099,805
2098	1.169.447,386	701.668,432	467.778,955	1.726.104,342	1.578.753,972
2099	1.081.524,173	648.914,504	432.609,669	1.596.329,680	1.460.057,634
2100	1.000.211,340	600.126,804	400.084,536	1.476.311,938	1.350.285,309
2101	925.011,895	555.007,137	370.004,758	1.365.317,557	1.248.766,058
2102	855.466,211	513.279,727	342.186,485	1.262.668,128	1.154.879,386
2103	791.149,220	474.689,532	316.459,688	1.167.736,248	1.068.051,447
2104	731.667,808	439.000,685	292.667,123	1.079.941,685	987.751,541
2105	676.658,421	405.995,052	270.663,368	998.747,829	913.488,868
2106	625.784,834	375.470,901	250.313,934	923.658,415	844.809,526
2107	578.736,105	347.241,663	231.494,442	854.214,491	781.293,742
2108	535.224,667	321.134,800	214.089,867	789.991,608	722.553,300
2109	494.984,573	296.990,744	197.993,829	730.597,230	668.229,174
2110	457.769,873	274.661,924	183.107,949	675.668,332	617.989,328
2111	423.353,106	254.011,864	169.341,242	624.869,185	571.526,693
2112	391.523,914	234.914,348	156.609,566	577.889,297	528.557,284
2113	362.087,754	217.252,652	144.835,102	534.441,525	488.818,468
2114	334.864,709	200.918,825	133.945,884	494.260,311	452.067,357
2115	309.688,390	185.813,034	123.875,356	457.100,063	418.079,326
2116	286.404,915	171.842,949	114.561,966	422.733,655	386.646,636
2117	264.871,975	158.923,185	105.948,790	390.951,035	357.577,167
2118	244.957,958	146.974,775	97.983,183	361.557,946	330.693,244
2119	226.541,148	135.924,689	90.616,459	334.374,734	305.830,550
2120	209.508,979	125.705,387	83.803,592	309.235,253	282.837,121

Ano	Biogás (m³/ano)	CH ₄ (m³/ano)	CO ₂ (m³/ano)	H ₂ V (m³/ano)	Energia Elétrica (kWh/ano)
2121	193.757,349	116.254,409	77.502,940	285.985,847	261.572,421
2122	179.189,982	107.513,989	71.675,993	264.484,414	241.906,476
2123	165.717,842	99.430,705	66.287,137	244.599,535	223.719,087
2124	153.258,586	91.955,151	61.303,434	226.209,672	206.899,091
2125	141.736,060	85.041,636	56.694,424	209.202,425	191.343,681
2126	131.079,839	78.647,904	52.431,936	193.473,843	176.957,783
2127	121.224,791	72.734,874	48.489,916	178.927,791	163.653,468
2128	112.110,680	67.266,408	44.844,272	165.475,364	151.349,418
2129	103.681,800	62.209,080	41.472,720	153.034,337	139.970,430
2130	95.886,634	57.531,980	38.354,654	141.528,672	129.446,956
2131	88.677,536	53.206,521	35.471,014	130.888,043	119.714,673
2132	82.010,443	49.206,266	32.804,177	121.047,414	110.714,099
2133	75.844,607	45.506,764	30.337,843	111.946,639	102.390,219
2134	70.142,339	42.085,404	28.056,936	103.530,093	94.692,158
2135	64.868,789	38.921,273	25.947,516	95.746,332	87.572,865
2136	59.991,723	35.995,034	23.996,689	88.547,783	80.988,826
2137	55.481,332	33.288,799	22.192,533	81.890,445	74.899,798
2138	51.310,048	30.786,029	20.524,019	75.733,631	69.268,565
2139	47.452,376	28.471,426	18.980,950	70.039,707	64.060,708
2140	43.884,738	26.330,843	17.553,895	64.773,873	59.244,396
2141	40.585,327	24.351,196	16.234,131	59.903,943	54.790,191
2142	37.533,978	22.520,387	15.013,591	55.400,151	50.670,870
2143	34.712,040	20.827,224	13.884,816	51.234,971	46.861,254
2144	32.102,265	19.261,359	12.840,906	47.382,944	43.338,058
2145	29.688,703	17.813,222	11.875,481	43.820,525	40.079,749
2146	27.456,601	16.473,960	10.982,640	40.525,942	37.066,411
2147	25.392,316	15.235,389	10.156,926	37.479,058	34.279,626
2148	23.483,231	14.089,939	9.393,292	34.661,249	31.702,362
2149	21.717,678	13.030,607	8.687,071	32.055,293	29.318,866
2150	20.084,866	12.050,920	8.033,946	29.645,262	27.114,569
2151	18.574,814	11.144,889	7.429,926	27.416,426	25.075,999
2152	17.178,294	10.306,976	6.871,318	25.355,162	23.190,697
2153	15.886,769	9.532,061	6.354,707	23.448,870	21.447,138
2154	14.692,345	8.815,407	5.876,938	21.685,901	19.834,665
2155	13.587,722	8.152,633	5.435,089	20.055,478	18.343,425
2156	12.566,149	7.539,689	5.026,460	18.547,636	16.964,301
2157	11.621,381	6.972,829	4.648,552	17.153,158	15.688,864
2158	10.747,644	6.448,587	4.299,058	15.863,523	14.509,320
2159	9.939,598	5.963,759	3.975,839	14.670,847	13.418,458
2160	9.192,304	5.515,382	3.676,922	13.567,840	12.409,610
2161	8.501,194	5.100,716	3.400,478	12.547,762	11.476,612
2162	7.862,044	4.717,226	3.144,818	11.604,377	10.613,759
2163	7.270,947	4.362,568	2.908,379	10.731,918	9.815,779
2164	6.724,292	4.034,575	2.689,717	9.925,055	9.077,794
2165	6.218,736	3.731,241	2.487,494	9.178,854	8.395,293
Total	1.622.127.571	973.276.543	648.851.028	2.394.260.295	2.189.872.221

Fonte: O autor.