



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



Viabilidade de minigeração de energia elétrica em aterros sanitários urbanos

Graduando: Hugo José Menezes Lourenço¹
Orientador: Prof. Dr. Jamson Justi²

¹Aluno do Curso de Engenharia de Produção da UFMS, campus Nova Andradina

²Professor (a) da UFMS, Curso de Engenharia de Produção da UFMS, campus Nova Andradina



RESUMO

O estudo aborda a viabilidade da geração de energia elétrica a partir do biogás gerado em aterros sanitários no Brasil. A introdução contextualiza a crescente preocupação ambiental com a gestão de resíduos sólidos no País. O objetivo do trabalho é avaliar a viabilidade da geração distribuída de energia e discutir estudos de caso de usinas termelétricas que se utilizam de biogás provenientes de aterros. A metodologia baseia-se em revisão bibliográfica e análise de dados de aterros sanitários em Palmas/TO e Caieiras/SP. Os resultados revelam o potencial energético do biogás, as variações na geração e a contribuição das usinas termelétricas para a matriz energética. As discussões enfatizam os benefícios ambientais e a viabilidade dessa abordagem, concluindo que é viável e sustentável. As considerações finais ressaltam a importância da geração de energia limpa e sugerem direções futuras para esse campo.

Palavras-chave: Fontes Renováveis; Minigeração; Aterros Sanitários.



1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população, o País precisa se atentar com o bem estar de todos, pensando nos requisitos básicos de sobrevivência, saneamento e geração de energia. Esse crescimento também ocasiona em mais geração de resíduos sólidos urbanos no país e no mundo, e grande parte desses resíduos são destinados a aterros sanitários.

De acordo com a Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, indicam as taxas de 1,47 kg/hab/dia e 2,2 kg/hab/dia de resíduos sólidos urbanos

É notável que com o avanço dessa urbanização, conseqüentemente tem-se um aumento na geração de resíduos sólidos, responsáveis por grandes impactos ao meio ambiente, sendo que os processos de tratamentos ou destinação mais comum desses resíduos seja a utilização em áreas de aterramento.

Um aterro sanitário de resíduos sólidos pode ser considerado como um reator biológico, formado por entrada e saída, entram os resíduos e saídas são os gases e chorume, a decomposição dessa matéria ocorre por dois processos: decomposição anaeróbica e decomposição aeróbia que é proveniente da redução de dióxido de carbono presente nos resíduos (Piñas *et al.*, 2016).

Observou-se que os aterros sanitários possuem grande capacidade para a minigeração de energia, por meio da produção do biogás. Esse processo acontece por meio da captação do biogás através de uma rede coletora composta por drenos verticais perfurados e succionados por sopradores, e por uma pressão negativa criada na célula do aterro por motores elétricos, depois passam por sistemas de controle de pressão, temperatura e vazão esse biogás é conduzido para um queimador ou sistema de geração de energia elétrica (Figueiredo, 2011).

A energia elétrica tornou-se indispensável para humanidade, quanto mais o País se desenvolve, mais há consumo de energia, proporcionando maior qualidade de vida para os habitantes (Tanaka e Lacerda, 2015).

O objetivo geral deste trabalho é analisar a viabilidade da minigeração de energia elétrica em aterros sanitários urbanos, por meio da revisão e síntese de estudos anteriores sobre o tema. Para tanto, é necessário compreender o estado atual da pesquisa sobre minigeração de energia em aterros sanitários, realizando buscas abrangentes em bases de



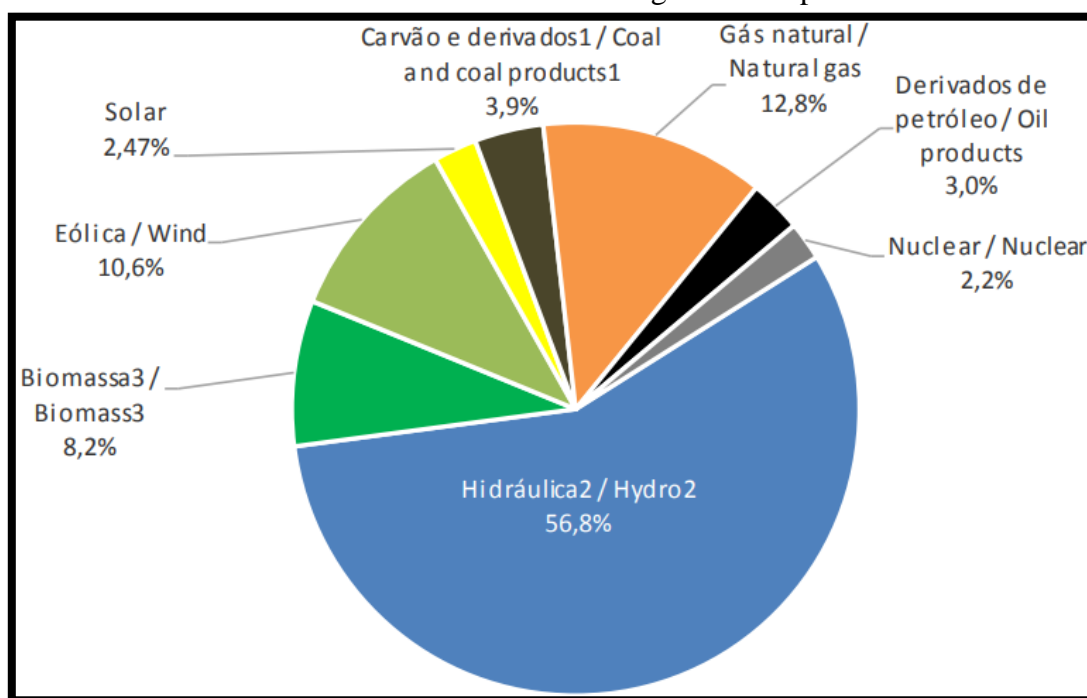
dados científicas para identificar estudos relevantes sobre a viabilidade da minigeração de energia elétrica em aterros sanitários urbanos, avaliando também a eficiência das tecnologias de captação e conversão do biogás.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Perfil da matriz elétrica brasileira

O Gráfico 1 abaixo publicado pelo Balanço Energético Nacional (BEN, 2022) mostra que o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente composta por fontes renováveis, sendo a fonte hídrica a principal protagonista, responsável por 53,4% da oferta interna.

Gráfico 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte



Fonte: BEN, 2022.

Quando se leva em conta que praticamente todas as importações provêm da usina de Itaipu, a contribuição da fonte hídrica chega a aproximadamente 57%. As fontes de energias renováveis representam uma parcela de 78,1% da oferta interna de eletricidade no país, que é calculada somando os valores da produção nacional e das importações, sendo estas últimas em grande parte provenientes de fontes renováveis. A partir da energia eólica registrou um total de 72,3 TWh em 2021, representando um incremento de 26,7% comparado ao ano anterior, em que a produção atingiu 57,1 TWh.



No mesmo ano, a capacidade instalada para a geração eólica no país teve um crescimento de 21,2%. De acordo com o Banco de Informações da Geração (SIGA), mantido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a capacidade total dos parques eólicos nacionais atingiu 20.771 MW (BEN, 2022).

A geração de energia a partir da biomassa utiliza resíduos orgânicos, como bagaço de cana-de-açúcar, cascas de arroz e resíduos florestais, para produzir eletricidade. Essa fonte é especialmente relevante no Brasil, devido à grande produção agrícola e à indústria sucroenergética, onde desempenha um papel crucial na preservação da “pegada” de carbono reduzida na economia brasileira e no avanço das áreas rurais. O Brasil, como um notável produtor de produtos agrícolas, pecuária e recursos florestais, ocupa uma posição proeminente no cenário global da bioenergia (Souza, 2019)

A geração hidrelétrica tem ocupado historicamente a posição principal no sistema elétrico brasileiro. A substancial contribuição dessa fonte à matriz energética deriva do vasto potencial hidrelétrico do país e das diversas vantagens inerentes a ela em relação às alternativas. Essa forma de geração de energia é de natureza renovável, economicamente competitiva e demonstra notável flexibilidade operacional, permitindo respostas praticamente instantâneas às oscilações na demanda.

Contudo, a expansão da hidreletricidade enfrenta obstáculos relacionados aos impactos sociais e ambientais negativos ligados a empreendimentos de grande porte, bem como aos consideráveis custos iniciais de construção. Além disso, novos projetos hidrelétricos estão progressivamente localizados a maiores distâncias dos principais centros de consumo, uma tendência notável no contexto brasileiro. Esse cenário requer investimentos suplementares em extensas redes de transmissão para assegurar o transporte eficaz da produção elétrica (Souza, 2019).

O gás natural é uma fonte fóssil abundante no Brasil e é utilizado em usinas termelétricas para gerar eletricidade. Essas usinas possuem grande flexibilidade para atender picos de demanda e também podem ser acionadas rapidamente. A média diária de produção ao longo do ano totalizou 133,8 milhões de m^3 /dia, enquanto o volume de gás natural importado alcançou 46,2 milhões de m^3 /dia. O gás natural contribui com 13,3% do panorama energético nacional.

A procura por gás natural experimentou um aumento de 22,3% em comparação ao ano anterior, em grande parte devido à expansão da geração de eletricidade utilizando



gás natural, com um crescimento de 62%, e também ao aumento de 21% no consumo industrial (BEN, 2022).

A energia solar tem crescido significativamente no Brasil nos últimos anos. A radiação solar é capturada por painéis fotovoltaicos, que convertem a luz solar em eletricidade. A expansão da energia solar tem sido impulsionada por seu potencial e pela busca por fontes mais limpas e sustentáveis. A energia solar é uma forma de energia alternativa, renovável e ecologicamente viável, que opera ao aproveitar a luz solar como sua fonte primária. Essa energia pode ser capturada e aplicada por meio de diversas tecnologias, incluindo sistemas de aquecimento solar, tecnologia fotovoltaica solar (energia solar fotovoltaica) e sistemas heliotérmicos (Solargis, 2020).

A energia eólica é gerada a partir do movimento do vento, capturado por aerogeradores. O Brasil possui um grande potencial eólico, especialmente nas regiões costeiras e em áreas de relevo mais elevado, o que torna essa fonte uma parte importante da matriz elétrica.

A energia eólica tem se destacado como uma das fontes de maior expansão ao longo da última década, atualmente ocupando a terceira posição na composição da matriz elétrica brasileira (Souza, 2019).

Embora em menor escala, algumas usinas termelétricas ainda utilizam derivados de petróleo para gerar eletricidade. No entanto, essa fonte tem perdido espaço devido à busca por alternativas mais sustentáveis.

A produção interna de petróleo diminuiu em 1,6% ao longo do ano de 2021, chegando a uma média diária de 2,9 milhões de barris. Desses números, 97% derivam de fontes marítimas. Entre as unidades federativas produtoras, a parcela mais substancial coube ao Rio de Janeiro, correspondendo a 80,6% do volume anual. Por outro lado, a produção em terra continuou a ser encabeçada pelo Estado do Rio Grande do Norte, abrangendo 37,1% do montante total de extração terrestre. Quanto ao consumo, houve aumentos de 9% no uso do óleo diesel de origem fóssil e um incremento de 9,8% na utilização de gasolina para automóveis. No setor de transporte, responsável por 71% do consumo global de óleo diesel fóssil (BEN, 2022).

Em relação ao carvão e derivados, a variedade de carvão empregada é principalmente o carvão vapor, com origem principalmente nacional, sendo os estados



produtores principais o Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A necessidade de carvão vapor para esse propósito aumentou em 48% quando comparado ao ano anterior.

No que se refere ao carvão metalúrgico, utilizado na fabricação de coque e seguindo as tendências da indústria siderúrgica, foi observado um incremento de 14,7% em sua demanda (BEN, 2022).

Além das fontes mencionadas, é válido destacar que o Brasil também está explorando o potencial do biogás gerado em estações de tratamento de esgotos e aterros sanitários. O biogás é produzido pela decomposição de matéria orgânica e pode ser capturado e utilizado como combustível em usinas termelétricas. Essa é uma abordagem interessante, pois aproveita resíduos orgânicos e reduz a emissão de gases de efeito estufa.

2.2 Geração Distribuída

A Geração Distribuída (GD) emerge como uma estratégia inovadora no âmbito global de energia, representando uma transição em direção a uma matriz elétrica mais ecologicamente equilibrada e robusta. Esse conceito abarca a produção de eletricidade em pontos próximos aos locais de consumo, reduzindo a sobrecarga a rede elétrica centralizada e minimizando as perdas durante a transmissão. A GD pode ser implementada através de diversas tecnologias, como sistemas de painéis solares, pequenas turbinas eólicas e dispositivos de cogeração (Junior, 2018).

No contexto do Brasil, a Geração Distribuída está ganhando impulso como uma alternativa promissora. Esta abordagem possibilita que os consumidores se transformem em produtores de energia ao instalar sistemas geradores em suas propriedades. O mecanismo de compensação, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), permite que o excesso de energia gerado por consumidores com GD seja injetado na rede elétrica, gerando créditos que podem ser utilizados posteriormente (Junior, 2018).

No contexto da Geração Distribuída, destacam-se duas classificações essenciais: microgeração e minigeração. A distinção entre ambas reside na capacidade instalada dos sistemas. A microgeração compreende sistemas com capacidade de até 75 kW, enquanto a minigeração abarca sistemas com capacidade superior a 75 kW e até 5 MW (Brasil, 2023).



No Brasil, a Lei nº 14.300/2022 e a Resolução Normativa nº 1.059/2023 consolidam as regras concernentes à geração distribuída, estabelecendo diretrizes explícitas para a compensação do excedente de energia. A legislação também introduziu a figura do "produtor independente de energia elétrica", permitindo que o excedente gerado seja reaproveitado em forma de créditos, em outros pontos de consumo, desde que tenha o mesmo CNPJ ou CPF, na concessionária de energia.

A possibilidade de geração de créditos figura como um dos pilares da regulamentação, possibilitando ao consumidor gerar um saldo positivo de energia em períodos de maior produção e empregar esse crédito nos meses de produção reduzida, estabelecendo uma relação de intercâmbio com a empresa de energia. Esse mecanismo contribui de forma significativa para a viabilidade econômica dos sistemas de Geração Distribuída e incentiva a adoção de fontes renováveis de energia (Silva, *et al.*, 2023).

Em síntese, a Geração Distribuída, com ênfase nas categorias de microgeração e minigeração, se configura como um componente vital para a transformação energética no Brasil, fomentando a produção de energia limpa e a participação ativa dos consumidores no ciclo de produção e consumo de eletricidade. A legislação recente fortalece essa perspectiva, criando um ambiente mais favorável para a expansão e exploração dessa modalidade de geração de energia (Silva, *et al.*, 2023).

2.3 Aterros sanitários urbanos

O uso de aterros sanitários para a disposição de resíduos sólidos representa uma opção de custo acessível, amplamente empregada no contexto brasileiro. De acordo com as descobertas registradas na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2000, conduzida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil produz diariamente um total de 228.413 toneladas de resíduos sólidos, das quais 82.640 toneladas são encaminhadas para acomodação em aterros sanitários (Landim, *et al.*, 2008).

Um aterro sanitário urbano é uma infraestrutura projetada para a disposição final adequada de resíduos sólidos urbanos. Diferentemente dos antigos lixões a céu aberto, os aterros sanitários são projetados com sistemas de engenharia e medidas ambientais onde deve ser realizada de maneira organizada, seguindo as normas operacionais específicas,



com a finalidade de minimizar os efeitos adversos sobre o meio ambiente e reduzir ao máximo possíveis danos ou riscos à saúde pública (Ferreira, 2018).

Segundo a análise de Ensinas (2003), a disposição final dos resíduos se posiciona como um dos principais desafios ambientais confrontados pelas áreas urbanas de maior porte no Brasil. A emissão não regulada do biogás, originado durante a decomposição anaeróbica da substância orgânica, representa uma ameaça ao ecossistema local, acarretando impactos sobre a vegetação, originando odores indesejáveis e acarretando riscos de explosões. Ademais, o biogás assume uma dimensão de relevância global, pois é composto por gases que contribuem para o fenômeno do aquecimento global.

De acordo com as considerações de Ensinas (2003), a disposição final de resíduos sólidos, frequentemente mencionada na literatura técnico-científica, emerge como uma questão ambiental crítica que afeta os centros urbanos globais, com tendência a se agravar devido ao aumento no consumo de produtos descartáveis. Entre as opções para tratar esses resíduos, os aterros sanitários emergem como uma alternativa viável. Contudo, uma consequência inerente desses aterros é a emissão de gases decorrentes do processo de decomposição de materiais orgânicos. Esses gases incluem principalmente dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) sendo este último suscetível a ser coletado e empregado na produção de energia.

Segundo Figueiredo (2012, p. 14), quando os resíduos sólidos urbanos são confinados em condições anaeróbicas dentro de um ambiente redutor, passam por um processo de decomposição. A partir da fração orgânica presente nesses resíduos, ocorre a liberação de biogás, uma mistura gasosa que inclui metano e outros gases. Vale ressaltar que o metano apresenta um elevado potencial para ser aproveitado como fonte de energia.

A decomposição anaeróbica (sem oxigênio) dos resíduos orgânicos depositados no aterro gera biogás, que é uma mistura de gases, principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de traços de outros gases. A geração de biogás é resultado da atividade microbiana que ocorre em ambientes de pouca oxigenação. O metano é um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global muito mais alto que o CO_2 , tornando sua captura e aproveitamento uma estratégia valiosa para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (Figueiredo, 2012).

Com base no Manual para Aproveitamento de Biogás ICLEI – LACS, no que diz respeito à duração total e remanescente do ciclo operacional do aterro, a expectativa de



vida de um aterro é influenciada pela dimensão da área reservada para o manejo dos resíduos sólidos, pelas alturas máxima e mínima das células de deposição (ou seja, até que altura as células do aterro podem ser preenchidas), e, sobretudo, pela quantidade de resíduos que é incorporada diariamente, mensalmente e anualmente.

Geralmente, a concepção dos aterros prevê períodos de 20 anos ou mais. Estratégias de compactação de resíduos, em conjunto com práticas de coleta seletiva e reciclagem, podem desempenhar um papel fundamental no aumento da longevidade operacional do aterro (ICLEI, 2009).

O método operacional do aterro, devem aderir a normativas específicas de cunho ambiental e prático, visando evitar riscos para a saúde pública e a segurança, e minimizando os efeitos adversos. Entre estas diretrizes estão:

- O gerenciamento da disposição de resíduos no aterro deve ser cuidadoso, a fim de impedir a exposição prolongada dos detritos sólidos ao ar aberto, o que poderia atrair animais indesejados.

- Em geral, os aterros sanitários consistem em células designadas. Cada célula possui sua área e limite superior de deposição de resíduos. Os detritos sólidos são inseridos na célula em atividade e, ao término de cada fase, a célula é coberta com terra (retirada das escavações) e vegetação. Normalmente, as células são usadas de forma sequencial.

- Os resíduos descartados são compactados e cobertos com terra ao final de cada ciclo de operação.

- Através desse confinamento, a matéria orgânica contida no biogás é submetida a uma decomposição anaeróbica, que resulta na formação do biogás e do chorume.

- Conjuntamente à deposição de resíduos, é imprescindível implementar um sistema de tubulações para coletar o chorume e o biogás gerados (ICLEI, 2009).

Em relação à abordagem de coleta e tratamento do líquido poluente conhecido como chorume, um líquido de coloração escura e odor desagradável, também é gerado durante o processo de decomposição anaeróbica dos resíduos sólidos depositados nos aterros (ICLEI, 2009).

Normalmente, o chorume é recolhido do interior do aterro por meio de sistemas de tubulações e direcionado para reservatórios especiais, onde é armazenado. Em muitos



casos, o chorume coletado é conduzido até uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) nas proximidades do aterro, a fim de minimizar os custos de transporte.

Com o objetivo de otimizar ainda mais os custos de transporte e reduzir despesas associadas ao tratamento, é sugerido implantar um sistema de tratamento de chorume diretamente no aterro, utilizando a evaporação como método. Esse sistema aproveitaria o biogás gerado no aterro como fonte de energia (ICLEI, 2009).

2.4 Geração de créditos através dos aterros sanitários

A geração de créditos através dos aterros sanitários, especificamente a utilização do biogás gerado nesses locais para a geração de energia elétrica, experimentou um significativo impulso e incentivo graças ao estabelecimento da Lei n. 14.300/2022 e da Resolução Normativa da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) n. 1.059/2023. Essas legislações desempenharam um papel fundamental na promoção desse tipo de geração de energia elétrica, abrindo caminho para a injeção de energia excedente na rede elétrica e a consequente obtenção de créditos energéticos (Brasil, 2022).

Antes da implementação dessas leis e normativas, a geração de energia elétrica a partir do biogás dos aterros sanitários enfrentava obstáculos regulatórios e operacionais significativos. No entanto, com a promulgação da Lei n. 14.300/2022, que estabeleceu diretrizes para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, e da Resolução Normativa ANEEL n. 1.059/2023, que regulamentou a compensação de energia elétrica, criou-se um arcabouço legal e normativo sólido que favoreceu essa prática (Silva e Miranda, 2023).

A principal maneira pela qual essas leis e normativas impulsionaram a geração de energia elétrica em aterros sanitários foi através da permissão para a injeção de energia excedente na rede elétrica. Isso permitiu que as instalações de geração em aterros sanitários pudessem não apenas atender às suas próprias necessidades energéticas, mas também contribuir para a rede elétrica pública. Como resultado, os proprietários e operadores de aterros sanitários passaram a receber créditos energéticos, que podem ser compensados em suas contas de energia (Silva e Miranda, 2023).

Além disso, essas legislações também incentivaram investimentos em tecnologias de captura e aproveitamento de biogás, tornando a geração de energia elétrica a partir



desse recurso mais eficiente e econômica. Isso não apenas contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa, mas também promove a diversificação da matriz energética, tornando-a mais sustentável.

Em resumo, a geração de créditos através dos aterros sanitários, usando o biogás gerado nesses locais, foi substancialmente impulsionada e incentivada graças à Lei n. 14.300/2022 e à Resolução Normativa ANEEL n. 1.059/2023. Essas medidas criaram um ambiente favorável para a geração de energia elétrica a partir do biogás, contribuindo para a promoção da sustentabilidade e para a expansão das fontes renováveis de energia no Brasil.

2.5 Estimativa de cálculo do potencial de biogás a ser produzido

No intuito de determinar a capacidade de produção de biogás em aterros, geralmente adota-se o cálculo proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (1996). Sendo assim, as seguintes equações são válidas:

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOCF \times F \times \frac{16}{12}, \text{ onde:} \quad (\text{Eq. 1})$$

L_0 : potencial de geração de metano do resíduo (m^3 biogás/kgRSD)

MCF : fator de correção do metano (%)

DOC : fração de carbono degradável (kgC/kgRSD)

DOCF : fração de DOC dissolvida (kgC/kgRSD)

F : fração de metano no biogás

$\frac{16}{12}$: conversão de carbono (C) para metano (CH_4) RSD: resíduo sólido domiciliar

MCF = 1 (aterro bem gerenciado)

$$DOC = 0,40A + 0,17B + 0,15C + 0,30D \quad (\text{Eq. 2})$$

Devido à considerável quantidade de alimentos e materiais orgânicos que são descartados em conjunto, a Equação 2 passou por alterações, resultando em:



$$DOC = 0,40A + 0,16(B + C) + 0,30D, \text{ onde:} \quad (\text{Eq. 3})$$

DOC : fração de carbono degradável (kgC/kgRSD)

A : percentual de papelão e tecidos = 22%

B+C : alimentos e outros resíduos orgânicos = 55%

D : resíduos de madeira = 2%

DOCF : fração de DOC dissolvida (kgC/kgRSD)

$$DOCF = 0,014T + 0,28, \text{ onde :} \quad (\text{Eq. 4})$$

T : temperatura (°C) na zona anaeróbia dos resíduos, estimada em 35°C

Portanto, substituindo os valores anteriormente calculados (Equação 3 e 4) na Equação 1, tem-se $L_0 = 0,071 \text{ kg } CH_4/\text{kgRSD}$. Considerando a densidade do CH_4 (0° C e 1,013 bar) como $0,0007168 \text{ t/m}^3$, tem-se $L_0 = 99,69 \text{ m}^3CH_4/\text{t RSD}$ (CENBIO, 2006d). A vazão de metano, em $\text{m}^3CH_4/\text{ano}$, pode ser calculada da seguinte forma:

$$LFG = k * Rx * L_0 * e^{-k(x-T)} \times, \text{ onde:} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Rx : fluxo de resíduo no ano (t/ano)

X : ano atual

T : ano de deposição do resíduo no aterro

$t_{1/2}$: tempo médio para 50% da decomposição = 9 anos

k : constante de decaimento (1/ano) = 0,077



2.6 Estudos de caso de aterros sanitários que aproveitam biogás

Em um estudo realizado em um aterro sanitário de Palmas – TO onde para avaliar a estimativa teórica da produção de biogás no Aterro Sanitário de Palmas - TO, utilizou-se o modelo LANDGEM. Esse modelo, criado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2001), descreve a geração de metano no aterro para cada ano de análise.

A quantidade de metano emitida (QCH_4i) é calculada como o produto de diversos fatores: o número de habitantes residentes na área urbana (PopUrb), a taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (Taxa RSU), a fração de resíduos coletada e depositada no aterro (RSDf), o potencial de produção de metano dos resíduos (L0), a quantidade de metano capturada e aproveitada (R), e o fator de oxidação do metano na superfície do aterro (OX). O cálculo é representado pela fórmula:

$$QCH_4i = (PopUrb \times Taxa \ RSU \times RSDf \times L_0 - R) \times (1 - OX)$$

Onde:

QCH_4 = quantidade de metano emitido [CH_4 /ano]; i = ano amostral estudado;

PopUrb = número de habitantes residentes na área urbana [habitantes];

Taxa RSU= resíduos sólidos urbanos gerados [ton/hab/ano];

RSDf = fração dos resíduos que é coletada e depositada no Aterro Sanitário [%];

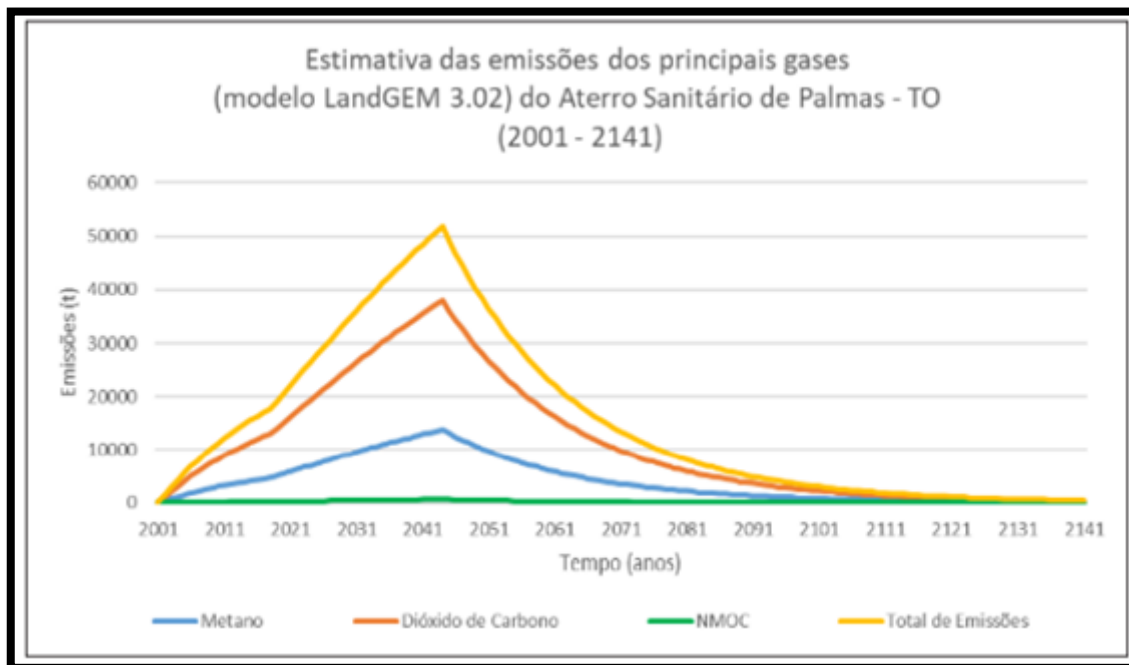
L0=potencial de geração de metano dos resíduos [ton. CH_4 /ton.rsu];

R = metano que é captado e aproveitado [ton. CH_4 /ano];

OX = fator de oxidação do metano na superfície do Aterro Sanitário.



Gráfico 2 – Estimativa das emissões dos principais gases(modelo LandGEM 3.02) do aterro sanitário de palmas TO (2001 – 2141).



Fonte: IBGE, 2023.

O Gráfico 2 acima ilustra o resultado da estimativa da produção dos principais gases encontrados na composição do biogás, utilizando modelagem ambiental por meio do software LandGEM.

Os valores apresentados no Gráfico 2 correspondem à estimativa da produção de cada gás gerado através do processo de decomposição da matéria orgânica contida no interior da área de armazenamento dos resíduos. Esses valores têm a capacidade de variar de acordo com as atividades diárias relacionadas aos procedimentos de disposição final dos resíduos nas células operacionais do aterro (Soares, et al. 2019).

Conforme as informações exibidas no Gráfico 2, a produção máxima de biogás gerada no Aterro Sanitário ocorre no ano de 2044. Nesse ano, que sucede imediatamente o encerramento da deposição de matéria orgânica na célula do aterro, é estimada uma produção de aproximadamente 13.834,08 toneladas de metano, 37.957,48 toneladas de dióxido de carbono e 594,62 toneladas de compostos orgânicos não metálicos (NMOC) (Soares, et al. 2019).



O sistema do grupo gerador LANDSET tem a capacidade de produzir 200 kW de eletricidade, e se esse sistema for mantido em operação durante todo o mês, é possível gerar um total de 432 MW de energia elétrica por mês a partir da quantidade atual de biogás gerado pelo Aterro Sanitário de Palmas, no estado do Tocantins (Soares, *et al.* 2019).

De acordo com os dados apresentados no último Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2017, referente ao ano base de 2016, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o consumo médio mensal de eletricidade em residências no Brasil foi de 132,872 kWh. Com base na quantidade de eletricidade a ser produzida pelo Aterro Sanitário de Palmas, no estado do Tocantins, é possível fornecer energia para aproximadamente 3.251 lares, utilizando a atual produção de biogás desse aterro como fonte de geração elétrica (Soares, *et al.* 2019).

Adicionalmente, com base nos dados apresentados no Gráfico 2, é previsto que em 2141 as emissões atmosféricas provenientes do Aterro Sanitário de Palmas - TO sejam insignificantes. Esse resultado decorre da ausência de nutrientes e de matéria orgânica rica em carbono disponível no interior do depósito de resíduos. Essa condição limita a atividade dos microrganismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e das cepas metanogênicas, resultando em uma produção mínima de gases. (Soares, *et al.* 2019).

A Tabela 1 apresenta os valores de liberação de metano no aterro Essencis - CTR Caieiras, abrangendo o período de 2002 até a projeção estimada para 2040. Durante o ano de 2007, a concentração média de metano no biogás foi de aproximadamente 40%.

A quantidade de metano gerada no ano de 2007 é calculada em 31.546.200,48 m^3CH_4 /ano ou 1.440,47 m^3CH_4 /h, conforme indicado na Tabela 1.



Tabela 1 - Geração anual de metano e volume de metano captado

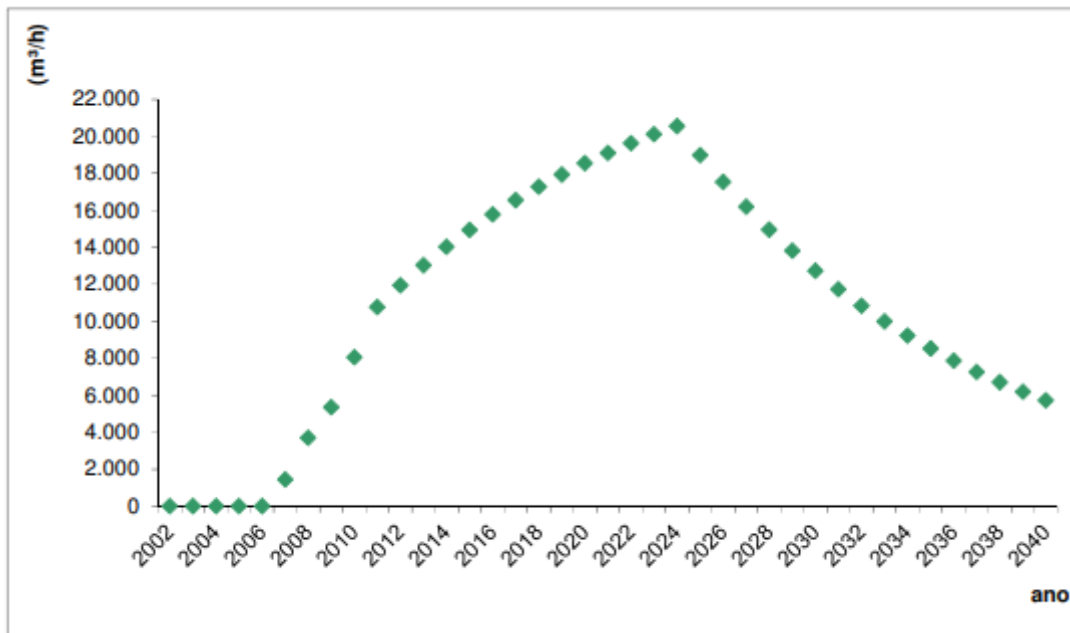
Ano	m ³ CH ₄ /ano	m ³ CH ₄ /h
2007	31.546.200,48	1.440,47
2008	51.346.418,26	3.692,72
2009	67.312.090,23	5.343,08
2010	88.732.775,75	8.047,18
2011	100.439.716,68	10.765,04
2012	111.382.471,46	11.937,87
2013	121.568.133,03	13.029,56
2014	130.826.799,35	14.021,90
2015	139.410.379,39	14.941,88
2016	147.239.495,51	15.781,00
2017	154.397.353,93	16.548,17
2018	161.088.591,33	17.265,33
2019	167.265.381,94	17.927,35
2020	172.967.278,33	18.538,48
2021	178.230.792,09	19.102,62
2022	183.089.627,68	19.623,38
2023	187.574.898,24	20.104,11
2024	191.715.324,81	20.547,88
2025	177.055.277,40	18.976,62
2026	163.522.348,00	17.526,18
2027	151.029.879,66	16.187,25
2028	139.497.877,92	14.951,26
2029	128.852.498,61	13.810,29
2030	118.754.095,34	12.727,96
2031	109.432.094,21	11.728,83
2032	101.018.554,98	10.827,08
2033	93.251.879,39	9.994,65
2034	86.082.334,20	9.226,23
2035	79.464.009,83	8.516,88
2036	73.354.526,43	7.862,07
2037	67.714.762,42	7.257,61
2038	62.508.604,09	6.699,62
2039	57.702.714,22	6.184,52
2040	53.266.318,73	5.709,04

Fonte: (Figueiredo, 2011).



A quantidade de metano produzida no ano de 2010 totaliza 88.732.775 metros cúbicos ou 86.047 m^3 de CH_4/h , conforme indicado na Tabela 1. A tendência de crescimento observada no Gráfico 3 está associada ao período em que o aterro recebe resíduos, pois a cada tonelada de lixo adicionada, acrescenta-se um novo potencial de geração de metano. O ponto mais alto da curva representa o último ano de deposição de resíduos no aterro. Durante o período de declínio, a trajetória da curva é influenciada pela constante "k", que se relaciona com a taxa de degradação da matéria orgânica ao longo do tempo (Figueiredo, 2011).

Gráfico 3 – Comportamento da vazão de metano captado



Fonte: (Figueiredo, 2011).

2.6.1 Determinação da potência e energia disponível

Para calcular a potência e a energia disponível, empregaram-se as seguintes fórmulas.

$$P_x = \frac{Q_x * \eta * PCI}{860000}, \text{ onde:} \quad (\text{Eq. 7})$$

P_x : potência disponível a cada ano (MW)

Q_x : vazão de metano captado ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{h}$)



PCI : poder calorífico de metano = $35,53.10^6 \text{ J/m}^3\text{CH}_4$

η : eficiência do grupo gerador: 28%

$$E = P_x * 24, \text{ onde:} \tag{Eq. 8}$$

E: energia disponível (kWh/ano)

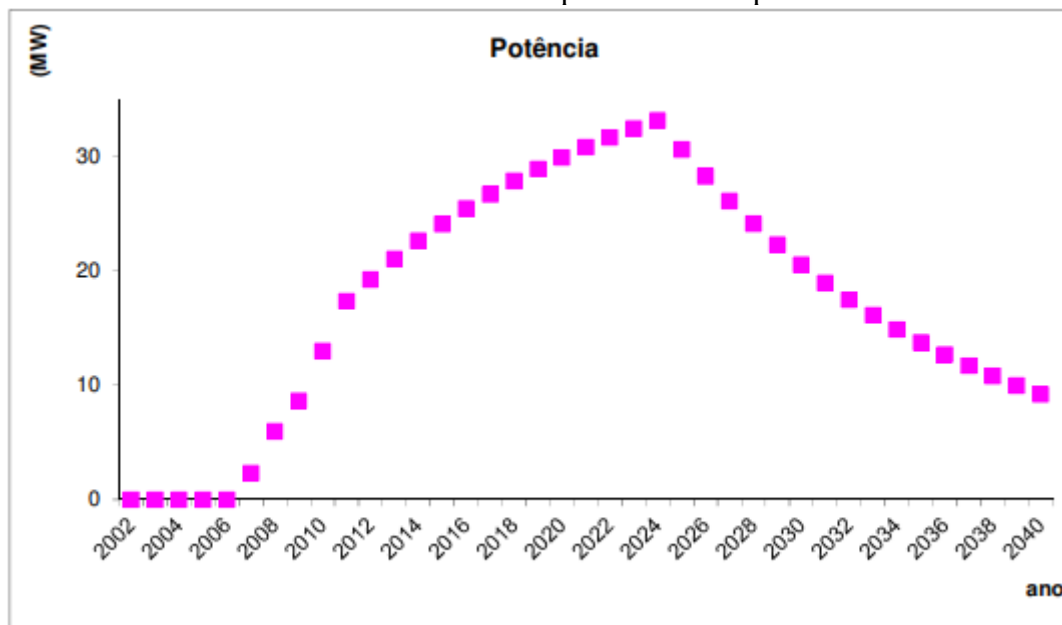
P_x : potência disponível (MW)

24: h/dia

Disp: disponibilidade = 7.000 h/ano

A Tabela 2 exibe os resultados dos cálculos da potência e da energia disponível no aterro, com base na taxa de liberação de metano. Para o ano de 2010, os valores obtidos são os seguintes: uma potência de 13 MW e uma energia de 248,7 MWh/dia. A tendência da curva de disponibilidade de potência e energia pode ser visualizada nos Gráficos 4 e 5, abaixo.

Gráfico 4 – Curva de comportamento da potência



Fonte: (Figueiredo, 2011).



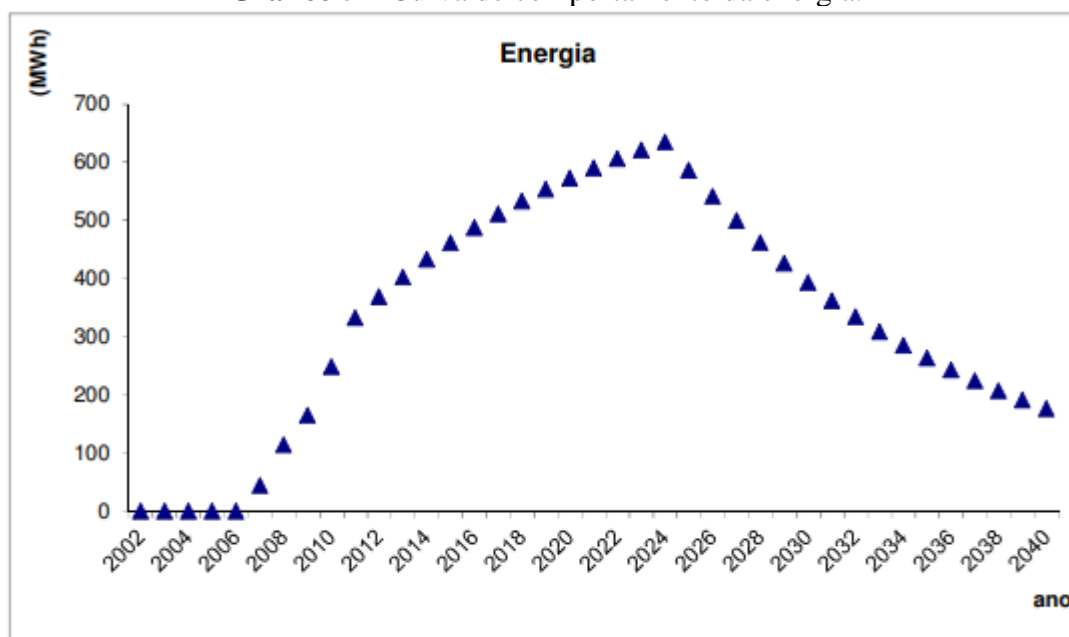
Tabela 2 – Potência e energia disponível em função da vazão de metano

Ano	Potência disponível (MW)	Energia disponível (MWh/dia)
2007	2,3	44,5
2008	6,0	114,1
2009	8,6	165,1
2010	13,0	248,7
2011	17,3	332,7
2012	19,2	369,0
2013	21,0	402,7
2014	22,6	433,4
2015	24,1	461,8
2016	25,4	487,8
2017	26,7	511,5
2018	27,8	533,6
2019	28,9	554,1
2020	29,9	573,0
2021	30,8	590,4
2022	31,6	606,5
2023	32,4	621,4
2024	33,1	635,1
2025	30,6	586,5
2026	28,2	541,7
2027	26,1	500,3
2028	24,1	462,1
2029	22,3	426,8
2030	20,5	393,4
2031	18,9	362,5
2032	17,4	334,6
2033	16,1	308,9
2034	14,9	285,2
2035	13,7	263,2
2036	12,7	243,0
2037	11,7	224,3
2038	10,8	207,1
2039	10,0	191,2
2040	9,2	176,5

Fonte: (Figueiredo, 2011).



Gráfico 5 – Curva de comportamento da energia.



Fonte: (Figueiredo, 2011).

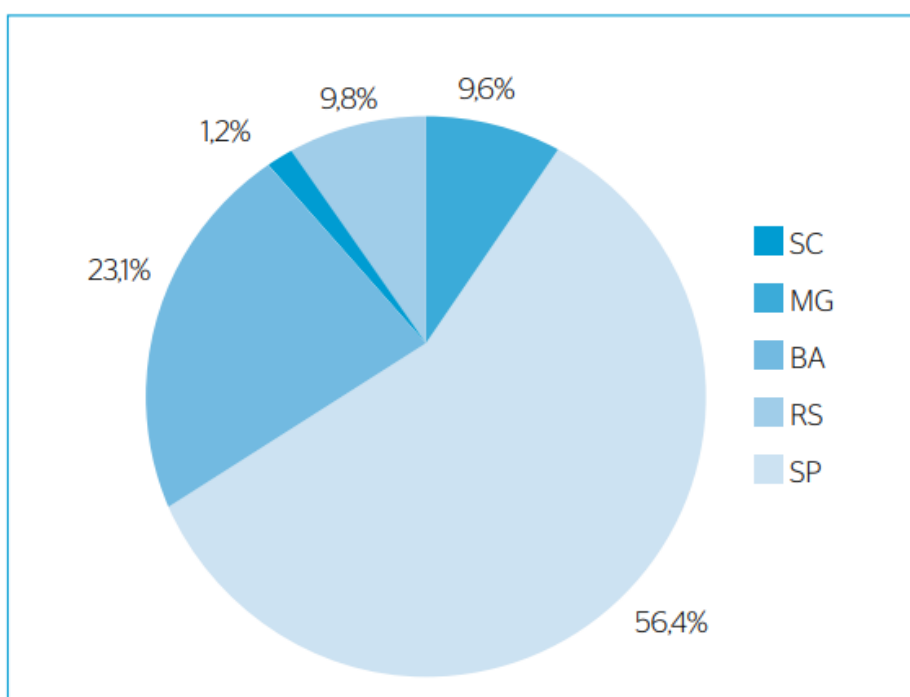
Tal como ocorre na produção de metano, o ponto de pico nas curvas indica o ano final em que resíduos foram depositados no aterro. Na fase de declínio, a curva é moldada pela constante "k", que está associada à decomposição gradual da matéria orgânica com o passar do tempo.



2.7 Usinas Termelétricas implantadas no Brasil que aproveitam o Biogás para geração de Energia

Os resultados da pesquisa conduzida neste estudo revelam que, no período compreendido entre 2004 e 2015, no Brasil, houve a implementação de nove usinas termelétricas especializadas na utilização do biogás proveniente de aterros de resíduos.

Gráfico 6 - Relação da distribuição (%) da energia elétrica gerada nas usinas termelétricas implantadas no país.



Fonte: (Nascimento et al, 2019)

Essas usinas contribuem com uma potência total instalada de 86,3 MW de energia elétrica, conforme evidenciado na Gráfico 6 e detalhado na Tabela 3 (Nascimento *et al.*, 2019).



Tabela 3 - Usinas termelétricas implantadas para geração de energia elétrica

Região	UF	Usina termelétrica	Município	Início da operação	Potência explorada (MW)	Custo (milhões de R\$)	Envio da energia
Sudeste		CTR BR-040	Belo Horizonte	05/2011	4,3	19,8	CEMIG
		Aterros Uberlândia I/II	Uberlândia	2012	2,8	47,5	CEMIG
	MG	Valor Gás	Juiz de Fora	08/2013	1,4	Desconhecido.	Desconhecido
	<i>Total</i>	<i>Minas Gerais</i>			8,5	67,3	
		Bandeirantes	São Paulo	01/2004	22,2	48	AES ELETROPAULO
	SP	Biogás Aterro São João	São Paulo	06/2007	22,4	64	AES ELETROPAULO
		Guataparã	Guataparã	08/2014	4,2	15	CPFL (subestação Pradópolis)
	<i>Total</i>	<i>São Paulo</i>			48,8	127	
	<i>Total</i>	<i>Sudeste</i>	6 projetos		57,1	194,3	
Sul	SC	Itajaí Biogás Energia	Itajaí	04/2014	1	7,5	CELESC
	RS	Biotérmica Recreio	Minas Leão	06/2015	8,5	28,7	Desconhecido
	<i>Total</i>	<i>Sul</i>			9,5	36,2	
Nordeste	BA	Termoverde Salvador	Salvador	01/2011	19,7	50	COELBA
		<i>Total do Brasil</i>			86,3	280,5	

Fonte: AMFRI (2014); ANEEL (2015^a); FEAM (2014); FloripaNews (2014); Turioni (2014); Brasil (2014; 2015); NARUC (2012); Silva (2006);

Na Região Sudeste, até o ano de 2015, foram construídas seis usinas termelétricas nos estados de Minas Gerais e São Paulo. Estas usinas somam uma capacidade instalada de 57,1 MW de energia elétrica. É importante observar que, com exceção da Usina Valor Gás em Juiz de Fora (MG), as demais fazem parte de projetos relacionados ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), sendo que três delas já obtiveram a Chamada de Registro de Emissões (CRE). Estas três usinas são a CTRS BR-040 em Minas Gerais e as usinas São João e Bandeirantes em São Paulo (Nascimento, 2019).

A usina termoelétrica de biogás localizada na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040, em Belo Horizonte (MG), iniciou suas operações em 2011, sendo operada pelo Consórcio Horizonte ASJA. Inicialmente, a usina era composta por quatro motores geradores, cada um com uma capacidade de 1,4 MW, totalizando uma potência de 5,7 MW. No entanto, em 2015, um dos motores foi desativado, reduzindo a capacidade de geração para 4,3 MW de energia elétrica (UNFCCC, 2015). A energia produzida passou a ser incorporada à rede da Companhia Energética de Minas Gerais (NARUC, 2012).



A usina utiliza o biogás proveniente do aterro da CTRS/BR-040, que foi submetido a práticas de gestão inadequadas durante os períodos de 1975 a 1994, inicialmente como um depósito de resíduos a céu aberto e, posteriormente, como um aterro controlado. A partir de 1995 até 2007, o local foi operado como um aterro sanitário (NARUC, 2012), acumulando cerca de 24 milhões de metros cúbicos de RSU (resíduos sólidos urbanos) (FEAM, 2014).

A usina termoeétrica localizada no aterro sanitário de Uberlândia, na cidade de Uberlândia (MG), iniciou suas operações em 2012 e está sob responsabilidade da empresa Energás Geração de Energia. Essa usina utiliza dois motores geradores, ambos com uma capacidade de produção de 2,8 MW de energia elétrica, a qual é integrada à rede de distribuição da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), conforme relatado pela UNFCCC (2015). O custo estimado para a implantação dessa usina foi de 10,8 milhões de euros (equivalente a R\$ 37,2 milhões, com a taxa de câmbio de €1 = R\$3,44) (FEAM, 2014).

A principal fonte de biogás explorada por essa usina é proveniente dos aterros de Uberlândia I e II. O primeiro aterro foi desativado em 2010, após armazenar aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Em 2010, a disposição de resíduos foi transferida para o segundo aterro, que tem a capacidade de receber e dispor 4,5 milhões de metros cúbicos de RSU em um período de 18 anos, de acordo com informações do Brasil (2015). O aterro sanitário recebe diariamente cerca de 600 toneladas de RSU (FEAM, 2009).

A usina termelétrica ValorGás, localizada em Juiz de Fora (MG), foi estabelecida em 2013 em colaboração com a ENC Power, uma empresa pertencente ao Grupo ENC Energy (ANEEL, 2015). Atualmente, a usina opera com um único motor gerador, capaz de produzir 1,43 MW de energia elétrica. Há planos de expansão previstos, com o objetivo de aumentar sua capacidade para 4,28 MW até o ano de 2022 (FEAM, 2014).

Essa usina faz uso do biogás gerado nas instalações do aterro sanitário da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) localizada na Zona da Mata. O aterro sanitário está operacional desde 2010 e presta serviços diários a aproximadamente 851 mil habitantes da região. Foi originalmente projetado para a disposição de 3,9 milhões de m^3 de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) ao longo de um período de 25 anos (Juiz de Fora, 2013).



A usina termelétrica Bandeirantes, localizada em São Paulo (SP), entrou em operação em 2004 e está sob responsabilidade da empresa Biogás Energia Ambiental, (Silva,2006). Notavelmente, essa usina foi pioneira no Brasil como a primeira a produzir energia elétrica em escala comercial a partir do biogás gerado por Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Para a geração de eletricidade, a usina dispõe de 24 grupos geradores Caterpillar, cada um com uma capacidade de 925 kW, proporcionando um total de 22,2 MW de energia elétrica. A eletricidade gerada é integrada à rede da AES Eletropaulo e é utilizada nas agências do Itaú Unibanco. O investimento necessário para a implantação dessa usina totalizou aproximadamente R\$ 48 milhões (UNFCCC, 2015).

A fonte primária de biogás para a usina é proveniente do aterro sanitário Bandeirantes, que esteve em operação de 1979 a 2007, sendo responsável pelo descarte de cerca de 7.500 toneladas diárias de RSU. A área ocupada pelo aterro sanitário abrange aproximadamente 140 hectares, com taludes atingindo uma altura de 110 metros, conforme relatado pela NARUC (2012). Ao longo de sua operação, o aterro sanitário Bandeirantes armazenou cerca de 35 milhões de toneladas de resíduos (Pedott & Aguiar, 2014).

3. MÉTODO DE PESQUISA

Para a realização desta pesquisa, foi adotada a metodologia de revisão bibliográfica, seguindo os princípios delineados por Marconi e Lakatos (2003) e Gil (2002). A revisão bibliográfica consiste na análise e síntese de estudos previamente realizados, incluindo livros e artigos científicos, com o intuito de abranger o conhecimento existente sobre determinado tema.

O período de pesquisa abrangeu o intervalo de 2010 a 2023, permitindo uma análise abrangente e atualizada das fontes disponíveis. Para a obtenção dos materiais, foram consultadas diversas fontes de informação, com destaque para bases de dados reconhecidas, tais como Scielo e Google Acadêmico. Essas plataformas oferecem um amplo leque de publicações acadêmicas, possibilitando a abrangência e a profundidade necessárias para esta pesquisa.



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O panorama da gestão de resíduos sólidos no Brasil revela a crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a busca por soluções eficazes para o manejo adequado dos resíduos urbanos. Os dados no estudo mostram que a quantidade de resíduos sólidos gerados no país continua a aumentar, tornando essencial a implementação de estratégias de tratamento e disposição final ambientalmente responsáveis.

A análise da geração e composição de biogás em aterros sanitários demonstra que esses locais representam uma fonte significativa de biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Esses gases têm potencial para contribuir significativamente para a produção de energia elétrica e para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A discussão sobre os benefícios ambientais e energéticos da captura de biogás enfatiza sua importância na mitigação das mudanças climáticas e na promoção da sustentabilidade. A redução das emissões de metano, gás de prejudicial ao efeito estufa, e a geração de energia limpa destacam-se como vantagens significativas desse processo.

A análise da geração de créditos através dos aterros sanitários destaca o papel crucial da legislação e regulamentação, como a Lei n. 14.300/2022 e a Resolução Normativa ANEEL n. 1.059/2023, na promoção da geração de energia elétrica a partir do biogás. Essas medidas criaram um ambiente favorável para a injeção de energia excedente na rede elétrica, beneficiando os proprietários de aterros sanitários.

A estimativa de cálculo do potencial de biogás a ser produzido, com base nas equações propostas pelo IPCC, fornece uma base sólida para avaliar a capacidade de geração de metano a partir dos resíduos sólidos urbanos. Essa abordagem permite uma previsão precisa da quantidade de biogás que pode ser aproveitada para a produção de energia elétrica.

Os estudos de caso em aterros sanitários, como os realizados em Palmas - TO e Caieiras - SP, demonstram o potencial de produção de biogás em diferentes contextos geográficos. Esses casos reforçam a viabilidade técnica e econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás e seu papel na diversificação da matriz energética.

A análise das usinas termelétricas implantadas no Brasil para aproveitar o biogás revela um aumento constante na capacidade instalada, totalizando 86,3 MW de energia



elétrica em nove usinas especializadas. Essas usinas, localizadas em diferentes estados, contribuem significativamente para a matriz energética do país e representam uma solução sustentável para o aproveitamento de biogás de aterros sanitários.

Entretanto, a implantação de sistemas de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários envolve custos significativos relacionados à instalação de equipamentos, como motores geradores, sistemas de captação e tratamento de biogás, e infraestrutura elétrica. No entanto, esses custos podem variar amplamente dependendo do tamanho da usina e da complexidade do projeto.

A viabilidade da geração distribuída no Brasil depende de vários fatores, incluindo os custos de implantação, a tarifação elétrica e os incentivos governamentais. Nos casos em que os custos de instalação são elevados, como em usinas maiores, o retorno sobre o investimento pode levar mais tempo para ser alcançado. No entanto, o governo brasileiro tem adotado políticas de apoio à geração distribuída, incluindo a compensação de energia excedente como crédito, o que pode tornar os investimentos mais atraentes.

O retorno sobre o investimento (ROI) na geração de energia a partir do biogás de aterros sanitários pode variar dependendo das condições locais, do tamanho da usina e dos custos iniciais. Em geral, os projetos de geração distribuída têm potencial para oferecer retornos sólidos no longo prazo. A geração contínua de eletricidade e a possibilidade de crédito podem compensar os custos iniciais em um período razoável.

O uso de biogás proveniente de aterros sanitários para a geração de energia elétrica oferece benefícios ambientais significativos. Isso inclui a redução das emissões de metano, um gás de efeito estufa muito mais potente que o dióxido de carbono. Além disso, a utilização do biogás ajuda a diminuir a pressão sobre os aterros sanitários, prolongando sua vida útil e reduzindo a necessidade de novos locais de disposição de resíduos.

A comparação dos estudos de caso apresentados na seção 2.6 destaca as diferenças em relação ao potencial de geração de biogás, capacidade instalada e impactos ambientais. As condições locais e a gestão dos resíduos têm um impacto direto nos resultados.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo proporcionou uma análise aprofundada da viabilidade e dos benefícios associados à geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente de aterros sanitários no Brasil. Observou-se que a gestão de resíduos sólidos no país está em constante crescimento, demandando soluções sustentáveis para lidar com o aumento na geração de resíduos urbanos.

A análise da composição e potencial do biogás em aterros sanitários revelou a existência de uma fonte substancial de energia, composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Esses gases apresentam um enorme potencial na produção de energia elétrica e na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas.

Ficou evidente que a geração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários é uma alternativa viável e ambientalmente benéfica. Embora os custos iniciais possam ser significativos, políticas governamentais de apoio à geração distribuída e os retornos a longo prazo tornam essa abordagem atrativa tanto para o setor público quanto para o privado.

A comparação dos estudos de caso apresentados destacou a diversidade de contextos geográficos e condições locais que afetam a geração de biogás, capacidade instalada e custos operacionais. No entanto, todos os casos ressaltam a importância da geração de energia elétrica a partir do biogás na diversificação da matriz energética do Brasil.

Em última análise, a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários é uma solução promissora que atende aos imperativos de sustentabilidade ambiental e energética. Além de contribuir significativamente para a matriz energética do país, essa abordagem oferece benefícios substanciais, incluindo a redução das emissões de gases poluentes, a diminuição da dependência de combustíveis fósseis e a prolongação da vida útil dos aterros sanitários. Com o apoio contínuo de políticas favoráveis e investimentos estratégicos, a geração de energia a partir do biogás está destinada a desempenhar um papel fundamental no futuro da energia no Brasil.



REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). (2015a) **Capacidade de geração do Brasil**. Brasília: aneel. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelListaUsinas.asp?classe=Biomassa&combustivel=19&fase=3>. Acesso em: 15 set. 2023

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – **Aneel resolução normativa Aneel nº 1.059**, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2023 disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. **Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS)**. Diário Oficial da União: Edição 5, Seção 1, Página 4. Brasília, DF, 2022.

Balanco Energético Nacional 2015, Ano Base 2014. Brasília: Ministério de Minas e Energia. Acesso em: set. 2023. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2015>. Acesso em: 20 out. 2023.

CAIEIRAS – Aterro Essencis – CTR Caieiras. **Redução das emissões de gases de aterro – Caieiras, SP**. Documento de concepção de projeto (DPC), Versão 0. Caieiras, SP, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-11082011-092549/en.php>. Acesso em: 15 set. 2023

Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO). **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENER-G-BIOG**. Relatório Técnico Final. São Paulo, 2005.

DE SOUSA, Flávio Gomide et al. **A matriz elétrica brasileira e a transição energética no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/35698>. Acesso em: 15 set 2023.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2003 (Dissertação de Mestrado). Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/301314>. Acesso em: 15 set. 2023.

FERREIRA, Wemerson Rocha. **Análise do potencial energético territorial do biogás proveniente de aterros sanitários para inserção na matriz elétrica do Estado de Minas Gerais no horizonte de 2050**. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AYJKUR>. Acesso em: 15 set. 2023.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Verdi de. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica-estudo de caso**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-11082011-092549/en.php>. Acesso em: 15 set. 2023



FIGUEIREDO, J. C. **Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 138 p.
Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/LGSA-96NQGK>. Acesso em: 15 set. 2023.

FLORIPANEWS. (2014) **Transformação de lixo em Energia elétrica já é realidade em SC**. FloripaNews, Florianópolis. Disponível em:
<http://www.floripaneWS.com.br/noticia/5200-transformacao-de-lixo-em-energia-eletrica-ja-e-realidade-em-sc>. Acesso em: 14 set. 2023.

GIL, Antonio Carlos *et al.* **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

IBGE. **Instituto brasileiro de geografia e estatística - ministério do planejamento, orçamento e gestão**. Palmas - TO, 2018. Disponível em:
<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/palmas/panorama>. Acesso em: 20 set 2023.

ICLEI - Brasil - **Governos Locais pela Sustentabilidade. Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009. Disponível em:
http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

JUIZ DE FORA. (2013) **Plano de Saneamento Básico de Juiz de Fora**, MG Etapa I, Diagnóstico. Juiz de Fora: Prefeitura. Disponível em:
http://www.planodesaneamento.pjf.mg.gov.br/pdf/apostila_conferencia_i.pdf. Acesso em: 15 set. 2023.

JUNIOR, Wanderley Paris *et al.* **Levantamento da geração distribuída compartilhada no Brasil**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/513>. Acesso em: 15 set. 2023.

LANDIM, Ana Luiza Pinto Ferreira; AZEVEDO, Lizandra Prado de. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-99, mar. 2008. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2433>. Acesso em: 15 set. 2023.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa *et al.* **Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, p. 143-155, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/xLRVKFVf9p46XTX563ztCfJ/?lang=pt>
Acesso em 20 out. 2023.



NATIONAL ASSOCIATION OF REGULATORY UTILITY COMMISSIONERS (NARUC). **Aproveitamento de gás de aterro sanitário no Brasil e sua regulação**. Washington, D.C.: NARUC. (2012)

PIÑAS, Jean Agustin Velásquez 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, v. 33, p. 175-188, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbepop/a/rJhdgmRnnkM3LgDXPSSQNWQ/?lang=pt>. Acesso em: 15 set. 2023.

PEDOTT, J.G.J.; AGUIAR, A.O. (2014) **Biogás em aterros sanitários: comparando a geração estimada com a quantidade verificada em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. Holos, v. 4, p. 195-211. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481547173020.pdf>. Acesso em: 15 set 2023.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (FEAM). (2014) **Potencial de energias renováveis-biomassa, resíduos e hidroeletricidade Belo Horizonte**: FEAM . v. 2. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/EnergiaMudancasClimaticas/Publicacoes2014/pemc_potencial_er_vol_ii_v1.0_15_04_2014.pdf. Acesso em: 15 set. 2023.

SILVA, John Renan Neres da; MIRANDA, Matheus Oliveira. **Análise do marco legal da geração distribuída (Lei 14.300 de 2022 e REN 1.059 de 2023) para o grupo B optante**. 2023. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/de1fb07d-6d34-40ae-87f9-6cb5fe448772>. Acesso em: 15 set. 2023.

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

SOLARGIS: **Solar resource maps of Brazil. 2020**. – Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>. Acesso em: 15 set. 2023.

SOARES, JOÃO EVANGELISTA MARQUES; MARQUES, MARCEL SOUSA; PEDROZA, MARCELO MENDES. **CROMATOGRAFIA CONFIRMA VIABILIDADE ECONÔMICA DA EXPLORAÇÃO DE BIOGAS GERADAS NO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS TO**. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/post/cromatografia-confirma-viabilidade-economica-da-exploracao-de-biogas-geradas-no-aterro-sanitario-de-palmas-to>. Acesso em: 15 set. 2023.

TANAKA, Kayro Massayuki da Silva; LACERDA, Lucas Augusto. **Electrical energy generation through good use of gases proceeding from urban solid residues from landfill sites**. 2015. 72 pages. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) –Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/10106>. Acesso em: 15 set. 2023.



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). (2015) Project Search. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1267696608.78>. Acesso em: 15 set. 2023.