

PERSPECTIVAS NA PRODUÇÃO E NO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS

Francisco das Chagas de Sousa¹

Resumo: Aterros sanitários são locais que tem a finalidade de decompor resíduos sólidos urbanos. Entre os resíduos urbanos, aqueles de origem orgânica passam por compactação e posteriormente por processos de degradação anaeróbica, que gera biogás com alto teor de metano. O metano é um dos principais poluentes atmosféricos, mas por ser fonte de carbono também pode ser utilizado para produção de energia elétrica. Aterros sanitários são uma das maiores fontes de emissão de metano (20% do metano antropogênico). Desde 2012, pela Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012, o consumidor pode ser atendido por modalidades distribuídas de energia elétrica, onde a fonte geradora pode estar localizada próxima ao local de consumo. O presente trabalho objetiva traçar um panorama das condições de aproveitamento de biogás em aterros sanitários, bem como entraves e medidas que vêm sendo tomadas para que haja viabilidade da captação desse gás. A pesquisa foi baseada em trabalhos publicados e armazenados em plataformas digitais, com publicações recentes, preferencialmente dos últimos cinco anos. A normativa da ANEEL dá aos aterros sanitários a possibilidade de aproveitamento do biogás para a geração distribuída de energia elétrica. Porém grande parte dos aterros não recebem investimentos suficientes que possibilitem a construção de sistemas adequados para a captação do biogás. Dessa forma, as condições atuais presentes nesses aterros, como infraestrutura e logística, não propiciam um bom aproveitamento do gás que é gerado. Faz-se necessária toda uma conjuntura para que esses empreendimentos possam fazer a captação adequada do biogás, e dar uma destinação sustentável.

Palavras-chave: Metano; geração distribuída; captação do biogás.

PERSPECTIVES IN THE PRODUCTION AND ENERGY USE OF BIOGAS FROM SANITARY LANDFILLS

Abstract: Sanitary landfills are places that have the purpose of decomposing urban solid waste. Among urban waste, those of organic origin undergo compaction and subsequently undergo anaerobic degradation processes, which generate biogas with a high methane content. Methane is one of the main atmospheric pollutants, but as a source of carbon, it can also be used to produce electricity. Sanitary landfills are one of the largest sources of methane emissions (20% of anthropogenic methane). Since 2012, by ANEEL Normative Resolution No. 482/2012, consumers can be served by distributed modes of electricity, where the generating source can be located close to the place of consumption. The present work aims to draw an overview of the conditions of use of biogas in landfills, as well as obstacles and measures that have been taken to make it viable to capture this gas. The research was based on works published and stored on digital platforms, with recent publications, preferably

1 Instituto Federal do Sertão Pernambucano, *campus* Salgueiro. Professor de química. Mestre em Química Orgânica. E-mail: sousafrancisco@rocketmail.com

from the last five years. The ANEEL regulations give landfills the possibility of using biogas for the distributed generation of electricity. However, most of the landfills do not receive sufficient investments to enable the construction of adequate systems for capturing biogas. Thus, the current conditions present in these landfills, such as infrastructure and logistics, do not provide a good use of the gas that is generated. A whole conjuncture is necessary so that these enterprises can make the adequate capture of biogas, and give a sustainable destination.

Keywords: Sanitary landfills; biogas; methane.

1 Introdução

Toda atividade produtiva tem como consequência a extração de matéria-prima do meio ambiente para a geração de produtos, que conseqüentemente originará resíduos urbanos (NEPOMOCENO; PONTAROLO, 2022). Esses resíduos quando não podem ser devolvidos à cadeia produtiva por meio da reciclagem, ou mesmo quando não recebem o devido tratamento, são destinados aos lixões e aos aterros sanitários. De acordo com Azevedo (2022) no Portal E-Cycle, aterros sanitários são obras de engenharia projetadas para garantir a correta disposição de resíduos sólidos gerados em meios urbanos, que por algum motivo não puderam ser reciclados, de forma que esses resíduos não possam causar nenhum mal à população ou ao meio ambiente onde esteja inserido.

Conforme a NBR (Norma Brasileira) 8419/1992, aterro sanitário trata-se de uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo. Esses resíduos quando levados ao aterro devem ser acompanhados de compactação, para que ocupem uma menor área possível, e soterramento (ABNT, 1992). Os materiais que são destinados aos aterros são aqueles que já passaram por várias tentativas de reciclagem sem sucesso (AZEVEDO, 2022). A implantação de aterros sanitários para o acolhimento de resíduos sólidos, conforme a Resolução CONAMA 01, de 23 de janeiro de 1986, exige a elaboração de EIA (Estudo de Impacto Ambiental) e seu respectivo RIMA (Relatório de Impacto Ambiental) (CONAMA, 1986).

No ano de 2010 foi instituída a Lei nº 12.305 que discorre sobre Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Um dos pontos importantes desta lei foi dispor as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, que é o conjunto de ações para tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos. Segundo a Lei nº 12.305 resíduos sólidos urbanos trata-se de: “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólidos ou semissólidos, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010).

Os aterros sanitários, pela NBR 8.419/1992 devem apresentar as seguintes características:

- Impermeabilização inferior e/ou superior: a impermeabilização é feita para impedir que o chorume (líquido formado pela degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos) entre em contato com as águas subterrâneas, podendo ser feita com argila selecionada e compactada;

- Sistemas de drenagem superficial: para afastar as águas das chuvas que possam infiltrar nos resíduos;
- Sistema de drenagem de gás: utilizado para liberação do gás formado pela decomposição dos resíduos orgânicos;
- Sistema de tratamento e drenagem de percolado: o tratamento do percolado deve ser feito no próprio aterro sanitário ou em uma estação de tratamento de esgoto antes do seu lançamento em corpos d'água (ABNT, 1992).

Como consequência da grande quantidade de material recebido, os aterros sanitários são uma das maiores fontes de emissão de metano, chegando a representar 20% do total de metano dirigido à atmosfera por meio de atividades antropogênicas (Teixeira *et al.*, 2009). Esse metano produzido é resultado da ação de bactérias anaeróbias que atuam sobre a matéria orgânica (SILVA *et al.*, 2013).

O gás metano apresenta potencial muito maior que outros gases para reter as emissões emitidas pelo sol sobre a superfície da terra; estima-se que essa capacidade chegue a ser de 23 a 28 vezes maior que a do dióxido de carbono (CO₂) (SANTOS, 2011). Como a produção de resíduos sólidos aumenta gradualmente em decorrência da atividade econômica, estima-se que o lançamento desse gás à atmosfera pelos lixões só aumente, dessa forma faz-se necessário que esse gás seja de alguma forma destinado para alguma atividade ou mesmo sequestrado antes que possa se tornar prejudicial (SILVA *et al.*, 2013).

O metano dos aterros sanitários é proveniente de uma mistura de gases denominada biogás. Esse biogás vai apresentar uma composição variada, uma vez que ele é resultado da matéria orgânica disponível e sabe-se que os rejeitos não compreendem sempre às mesmas composições, mas de forma geral é composto principalmente por metano (40–60%) e dióxido de carbono (30–45%), além de outros gases (H₂, N₂ e H₂S) em pequenas quantidades (SANTOS, 2011).

Uma forma de evitar que todo metano seja emitido para a atmosfera é aproveitando o biogás pelo uso do metano como combustível para geração de energia. Por ser uma fonte de carbono, o metano (CH₄) é um combustível. O aproveitamento para uso energético pode ocorrer por diferentes frentes. Zavarise *et al.* (2021) aponta algumas possíveis maneiras de se trabalhar com o biogás; incorporação direta às redes de gás natural; utilização como combustível de uso veicular; aplicação para incineração de materiais perigosos e contaminantes dentro do próprio aterro.

Embora haja uma gama considerável de aplicações para o biogás, deve-se levar em conta que o uso desse gás se deve ao metano, ficando os demais gases em segundo plano (LANDIM; AZEVEDO, 2008). Por conta disso que os estudos de viabilidades da produção e destinação do biogás se fazem tão importantes, não só para constatar uma situação presente, mas também diagnosticar problemas que possam levar a mudanças que otimizem o reaproveitamento do biodiesel, como sistemas mais adequados para a captação do biogás, purificação do gás produzido no aterro, sistemas de produção descentralizada de energia.

Diante disso, o presente trabalho busca traçar um panorama sobre o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários, bem como entraves que dificultam essa exploração.

O presente trabalho está estruturado em introdução, metodologia, resultados e discussões, conclusões e referências bibliográficas.

2 Metodologia

O presente trabalho é uma revisão bibliográfica que tem como base para sua construção a pesquisa em trabalhos acadêmicos, como artigos científicos, monografias, trabalhos de conclusões de curso e dissertações. Além da pesquisa acadêmica, foram consultadas Leis, Legislações e Normas relacionadas ao tema da pesquisa. As fontes citadas no presente trabalho foram, em sua grande maioria, desenvolvidas no Brasil e em diferentes regiões, uma vez que as leis, normativas, políticas públicas e legislações citadas no trabalho referem-se ao território brasileiro. A busca dos trabalhos foi realizada nas plataformas Google Acadêmico® e Scielo Brasil®, preferencialmente do período de 2017 a 2022. As palavras-chave usadas na busca foram: *biogás, aterro sanitário, lixões, geração distribuída e cogeração de energia*. Na Tabela 1 está descrito os trabalhos científicos incluídos no presente trabalho.

Tabela 1 - Trabalhos acadêmicos adotados no trabalho

Primeiro autor	Ano	Modalidade	Periódico/Universidade
Andrade, A. B. Z.	2022	TCC	UFRN
Borges, H. D.	2016	Monografia	UnB
Borges, P. B.	2016	Artigo	Revista Brasileira En. Renováveis
Cardoso, L. M.	2019	Resumo Expandido	Unisinos
Coelho, T. C.	2011	Artigo Científico	Fórum Ambiental
Eidam, E. L.	2019	TCC	UTFPR
Gomes, K. C.	2020	Trabalho completo	Univali
Landim, A. L. P. F.	2008	TCC	BNDES Setorial
Lyra, G. B.	2018	Artigo Científico	Revista Brasileira de Geografia Física
Marreira, J. A.	2021	TCC	UFC
Melo, A. R.	2014	TCC	UTFPR
Melo-Schlub, A. C.	2019	Artigo Científico	Brazilian Journal Develop.
Nascimento, D. P.	2017	Trabalho completo	UFPA
Necker, H. S.	2013	Artigo Científico	Ver. El. G., Ed. e Tec. Amb. - REGET
Nepomoceno, T. A. R.	2022	Artigo Científico	Int. Jour. of Env. Res. Res. and Sci.
Oliveira, M. G. N.	2021	TCC	ETEC
Paulino, R. S.	2022	Artigo Científico	Revista Conjecturas
Crovador, M. I. C.	2018	Artigo Científico	Revista em Agr. e Meio Ambiente
Santos, A. C.	2011	Dissertação	UFBA
Silva, T. N.	2013	Artigo Científico	Revista Engenharia Sanitária Ambiental
Silva, J. A. L.	2018	Especialização	IFCE
Silva, C. de O.	2020	Artigo Científico	Ver. Ibero-Americana de Ciên. Amb.
Teixeira, C. E.	2009	Artigo Científico	Revista Engenharia Sanitária Ambiental
Vieira, G. E. G.	2015	Artigo Científico	Revista Liberato

Primeiro autor	Ano	Modalidade	Periódico/Universidade
Zank, J. C. C.	2020	Artigo Científico	Revista Exacta
Zavarise, J. P.	2021	Artigo Científico	Latin American Journal of Energy Res.

Fonte: do autor.

A revisão bibliográfica consiste na análise de trabalhos científicos já desenvolvidos sobre determinados temas específicos. Coma finalidade de descrever os possíveis avanços ocorridos dentro da temática em questão. Os trabalhos foram apresentados na presente pesquisa em ordem de relevância para o assunto abordado.

3 Resultados e discussões

Quando o assunto é sustentabilidade dois pontos merecem bastante destaque; a produção de resíduos sólidos e o consumo de combustíveis fósseis. Por mais que se trabalhe para se buscar fontes alternativas de energia que ofereçam sustentabilidade e mitigue impactos sobre o meio ambiente, os combustíveis de origem fóssil ainda são bastante difundidos em nossa sociedade e praticamente todos os meios de produção estão atrelados à sua utilização (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

A produção de resíduos sólidos tanto no Brasil quanto no mundo vem aumentando, por mais que haja campanhas para incentivar o uso e a produção sustentável de bens e alimentos (GOMES, 2020). Dados da Abrelpe (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) em 10 anos, de 2010 a 2019 a geração de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil aumentou consideravelmente, passando dos 67 milhões para 79 milhões de tonelada por ano. O aumento percentual nesse período foi de 19% no país, com um crescimento de 9% no índice de geração per capita (ABRELPE, 2021).

Os resíduos orgânicos após serem compactados nos aterros sanitários passam por um processo de degradação anaeróbica por diferentes grupos de microrganismos, e o resultado é a produção do gás de aterro, um biogás que compreende uma mistura gasosa com alto teor de metano (CH₄) (PAULINO *et al.*, 2022).

De acordo com o Panorama do Biogás no Brasil (2021), a produção de biogás no Brasil foi de 2,2 bilhões de metros cúbicos, com um total de 675 plantas instaladas, sendo que em 2020 o número de novas plantas foi de 148, um aumento de 22% no número de novas plantas em relação a 2019, sendo que 94% das plantas são destinados à produção de energia.

Conforme o Panorama do Biogás no Brasil (2021) os substratos usados para a produção de biogás no Brasil são divididos de acordo com a sua origem: material de origem agropecuária, rejeitos industriais e aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (ETE). Destas três fontes o principal substrato utilizado para produção de biogás em sistemas de biodigestão é a agropecuária, representando 79% das plantas em operação no país, porém, sua contribuição no volume total de biogás é de apenas 11%. Por sua vez as plantas que processam resíduos sólidos urbanos ou efluentes de estações de tratamento de esgoto representam apenas 9% das plantas em operação, em contrapartida, são responsáveis

por 73% do biogás produzido no país. Na Tabela 2 tem o descritivo da produção de biogás no Brasil com suas respectivas fontes:

Tabela 2 - Volume da produção do biogás por substrato em planta em 2020

Origem do substrato	Quantidades de plantas	Volume de biogás
		Nm ³
Agropecuária	503	203.048.019
Indústria	78	283.795.333
RSU e ETE	57	1.342.221.982

Fonte: Panorama do biogás no Brasil 2020.

Como pode ser conferido na tabela, existe viabilidade com relação à produtividade para a obtenção do biogás a partir de aterros sanitários. O número de plantas provenientes dos Resíduos Sólidos Urbanos e Estações de Tratamento de Esgotos, apesar de serem em menor número oferecem maior volume na mistura de gás produzido. Um maior número de plantas em aterros poderia significar uma produção de biogás.

Com a finalidade de gerenciar e nortear a questão dos RSU o Governo Federal regulamentou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) por meio do decreto nº 10.936/2022, em que também foi criado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) que tem a finalidade de traçar estratégias de longo prazo. O Planares apresenta uma proposta macro que orienta Planos de ações para os estados brasileiros na hora de tomarem medidas que tenham por finalidade o cumprimento dos objetivos no PNRS. Entre os termos previstos na política de resíduos sólidos está o quarto, que preconiza “metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos” (BRASIL, 2022).

Para Vieira *et al.* (2015) o biogás de aterros sanitários, produzido naturalmente da degradação da matéria orgânica, é uma boa opção de aproveitamento para o setor energético. Apesar de haver uma viabilidade em relação à produtividade desse gás em aterros sanitários, é importante ressaltar o que observam Crovador *et al.* (2018), que se deve considerar não apenas a questão econômica na produção do biogás, mas também os aspectos relacionados à sustentabilidade, na sua produção, uma vez que durante o processo pode haver danos ao meio ambiente local, aos trabalhadores que já se encontram no aterro trabalhando com reciclagem e também todo um cuidado com as populações vizinhas.

Com relação ao poder energético, o biogás, por ser uma mistura de gases, sendo os de maiores proporções CO_{2(g)} e CH_{4(g)} apresentará um menor poder calorífico por kg, quando comparado ao próprio metano depois de purificado e livre de CO₂ e H₂O (ZANK *et al.*, 2020). Isso ocorre por que tanto a água, quanto o gás carbônico presente no biogás absorverá um percentual do calor gerado na queima do metano. Dessa forma, à medida que o percentual de CO₂ for sendo removido do biogás, o poder calorífico vai aumentando, podendo chegar, até mesmo a um valor acima de 100%, quando se compara o biogás com 35% de CO₂ e com 5,0% de CO₂ (ZANK *et al.*, 2020).

Vale salientar que por meio da Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica nº 482 de 17 de abril de 2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, podendo também fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2022). De acordo com a Resolução o estímulo que há para a geração de energia distribuída reside nos benefícios que a microgeração e minigeração de energia proporciona ao sistema elétrico, como o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2022).

Geração Distribuída é o termo usado para a compensação de energia elétrica no Brasil. É caracterizada pela geração de energia elétrica junto ou próxima do consumidor final (FOCUS, 2021). Por sua vez Marreira (2021) entende que a Geração Distribuída (GD) não se limita a uma única definição, mas pode ser generalizada como um modelo descentralizado de geração de energia elétrica. Essas características tornam o biogás uma fonte importante para a geração distribuída de energia elétrica, com a finalidade de alimentar o próprio complexo do aterro sanitário, quanto também consumidores próximos ao empreendimento. Mas para isso é necessário que haja geração consistente desse gás.

Num comparativo entre a produtividade de biogás numa ETE e num aterro sanitário, Borges *et al.* (2016) estudaram estas duas unidades da cidade de Itajubá (MG), e perceberam que a produção *per capita* de biogás no aterro pode chegar até quatro vezes a produção do mesmo gás na estação de tratamento de esgoto. É sabido também que a produção de biogás por meio de reatores também pode ser mais rentável (MÉLO-SCHLUB *et al.*, 2019), porém, segundo Borges (2016) o uso de reatores trazem consigo uma série de desvantagens, como: emanção de maus cheiros, baixa capacidade do sistema para suportar substâncias tóxicas, longo intervalos de tempo para a partida do sistema, necessidade de pós-tratamento, considerável perda de metano.

Metodologias para determinação de emissão de gás metano em aterros

Há dois tipos gerais de modelos para a determinação da produção de gás metano em aterros sanitários (AWADA, 2020): (i) estequiométricos, onde é feito o cálculo da produção máxima teórica, levando em consideração as reações de decomposição anaeróbia da matéria orgânica; (ii) cinéticos, que utilizam modelos empíricos, baseados em equações matemáticas, que simulam o processo biológico e físico-químico da produção de biogás no aterro (FERNANDES, 2009).

O modelo School-Canyon é um modelo empírico de primeira ordem amplamente usado tanto por indústrias quanto por agências reguladoras. Esse modelo, como outros de primeira ordem são usados para estimar a produção de metano durante a vida de um aterro, porém esses modelos podem apresentar divergências bastante significativas (SOUZA, 2009). O modelo Tchobanoglous, Thessen e Vigil considera todo o volume do gás levando em conta toda a conversão do material biodegradável em CH_4 e CO_2 (FERNANDES, 2009). Outro modelo de primeira ordem é o LandGEM 3.02. Este modelo procura estimar a produção de metano em intervalos de tempo menores, de forma que se aproxime de uma integração real na geração de metano (SANTOS, 2014).

O modelo desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 1996) é uma das metodologias mais praticáveis em meios acadêmicos, tanto ela quanto suas variações (“Equação 1”). Segundo Lyra *et al.* (2018) o modelo do IPCC tem a vantagem de considerar as especificidades do resíduo, bem como projetar a emissão para as mais diferentes condições de resíduos depositados. A “Equação 1” descreve o modelo do IPCC (VIEIRA *et al.*, 2015)

$$Q(\text{CH}_4) = \frac{(\text{POP}_{\text{urb}}) \times (\text{TaxaRSD}) \times (\text{RSD}_f) \times (\text{L}_0)}{\text{pCH}_4} \quad (1)$$

- $Q(\text{CH}_4)$: metano gerado [$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$];
- POP_{urb} : população urbana [habitantes];
- Taxa RSD: taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante por ano [kg de RSD/habitante.ano];
- RSD_f : fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos [%];
- L_0 : potencial de geração de metano do lixo [kg de CH_4/kg de RSD];
- pCH_4 : massa específica do metano [kg/m^3], que é $0,740 \text{ kg}/\text{m}^3$.

A presente metodologia é bastante acessível além de ser muito usado por órgãos ambientais (ALVES; ROLIM, 2019), levando em consideração a quantidade de metano que ode ser gerado por diferentes tipos de resíduos sólidos (AWADA, 2020). Para cálculos mais específicos são necessárias informações como a quantidade de lixo produzido, a quantidade produzida por habitante, e um parâmetro do tipo de resíduo sólido existente no aterro (COELHO *et al.*, 2011).

O fator L_0 pode ser calculado por meio da “Equação 2” (MACEDO, 2019):

$$L_0 = \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_f \times F \times (4/3) \quad (2)$$

- L_0 - o potencial de geração de metano dos resíduos em toneladas de $\text{CH}_4/\text{tonelada}$ de resíduo;
- FCM - fator de correção de metano;
- COD - carbono orgânico degradável, dado em tonelada de C/tonelada de resíduo;
- COD_f - fração de COD dissociada;
- F - fração do metano presente no biogás em volume;
- $(4/3)$ - fator de conversão do carbono em metano, dado em tonelada de $\text{CH}_4/\text{tonelada}$ de C.

Para o cálculo do carbono orgânico degradável, é necessário que se leve em conta a quantidade de carbono que possa estar presente em cada componente do resíduo (AWADA, 2020). Necker e Rosa (2013) observam que a quantidade de carbono em cada componente pode apresentar variações significativas de um local para outro. O cálculo da fração de carbono orgânico no lixo (DOC) está na “Equação 3” (CROVADOR, 2014):

$$\text{DOC} = (0,40.A) + (0,17.B) + (0,15.C) + (0,30.D) \quad (3)$$

Onde:

- DOC = Fração de carbono orgânico degradável no lixo.
- A = Fração de papel e papelão no lixo (%).
- B = Fração de resíduos de parques e jardins no lixo (%).
- C = Fração de restos de alimentos no lixo (%).
- D = Fração de tecidos no lixo (%).

Para o cálculo da fração de carbono orgânico do lixo que pode se decompor (DOCf) utiliza-se a “Equação 4” (MACEDO, 2019):

$$\text{DOCf} = 0,014.T + 0,28 \quad (4)$$

Onde:

- T = Temperatura na zona anaeróbia dos resíduos, estimada em 35°C.
- DOCf = Fração do DOC que pode se decompor.

O DOCf vai depender da composição do resíduo depositado no aterro.

Na Tabela 3 há o teor de carbono degradável estimável para cada tipo de material.

Tabela 3 - Teor de carbono degradável por material

Material	Porcentagem COD em massa
Papelão	40
Restos de alimentos	15
Resíduos de parques e jardins	17
Tecidos	40
Madeiras	30

Fonte: (BRITTO, 2006, *apud* MACEDO, 2019)

É importante considerar que aterros que oferecem tratamentos preliminares apresentarão menor quantidade de biogás produzido. Isso acontece devido à retirada de material que pode ser reaproveitado para outro fim que não a produção de biogás.

Materiais como madeira, que são separados antes de destinados ao aterro diminuem consideravelmente o teor de carbono degradável de um aterro. É o que constata Eidam (2019) ao levantar uma pesquisa sobre a capacidade do aterro sanitário de Ponta Grossa – PR em produzir biogás com e sem a seleção preliminar dos resíduos sólidos. O pesquisador verificou que a remoção de uma parte do material inerte aumentaria de forma significativa a produção do biogás, uma vez que teria maior disponibilidade de matéria orgânica passível de ser degradada. O percentual de produção de biogás por metro cúbico seria mais eficiente. Além disso, o material inerte poderia ser destinado a algum tipo de reciclagem ao invés de ser tratado apenas como resíduo.

Já Lyra *et al.* (2018) usaram a metodologia do IPCC (1996) para estimar a produção de biogás e metano no aterro sanitário do município de Olho D'água das Flores (AL), que atende uma série de municípios da região. Sobre os dados obtidos da produção de biogás pelo aterro sanitário, os autores encontraram uma projeção no aumento na produção de metano de 4,7% entre 2015 e 2050. O potencial estimado para a geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás no intervalo de 2015 a 2050 também teve projeção de aumento parecido com a produção de biogás, com um valor de 41,6%. Na pesquisa os autores levaram em consideração dados que estimam o aumento da população urbana, bem como o crescimento da região no intervalo de tempo indicado.

Zavarise *et al.* (2021) em sua pesquisa pontuam alguns aspectos positivos em relação à emissão de metano e biogás em aterros sanitários: geração distribuída de eletricidade no Brasil; ao aumento da segurança energética do país; aproveitamento energético via geração de energia térmica; substituição da demanda local por gás natural. Porém os mesmos autores lançam pontos a serem pensados a respeito dessa modalidade energética: falta planejamento estratégico; falta de modernização à gestão dos aterros sanitários no Brasil; destinação inadequada dos RSU; falta de dados mais atualizados sobre o RSU produzido no Brasil. Os autores ainda alertam para superestimação da quantidade de CH₄ possível de ser produzido com os modelos matemáticos disponíveis (ZAVARISE *et al.*, 2021).

Porém Silva *et al.* (2020) realizaram em aterro de Maceió-AL, pesquisa para o levantamento da composição do biogás gerado por meio de cromatografia gasosa. Os autores puderam constatar que a produção média dos dois principais constituintes do biogás analisado (TABELA 4), está de acordo com os dados apontados por Tchobanoglous *et al.* (1993), podendo então ser adequado para o reaproveitamento energético. Os dados obtidos pelo autor pode apresentar um panorama geral dos aterros em termos de constituição do biogás, facilitando assim, a adoção de modelos para estimar tanto a produção do biogás, quanto estimar o aproveitamento energético.

Tabela 4 - Composição percentual do biogás em aterro de Maceió

Material	Porcentagem COD em massa
CH ₄	56,86
CO ₂	41,72
O ₂	0,22
H ₂	0,00
N ₂	1,20

Fonte: Silva *et al.* (2020).

Nascimento *et al.* (2017) estimaram a geração de biogás no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa – PB. Os pesquisadores adotaram dados de 2003, quando o aterro entrou em funcionamento, até o ano de 2015. Os dados apontados na pesquisa mostram uma projeção acima de 1.288% para a produção do CH₄ de 2003 para 2015, indo de 70.325 m³CH₄/ano para 934.365 m³CH₄/ano. Em termos de aproveitamento energético Cardoso *et al.* (2019) apresentaram em sua pesquisa os parâmetros para a qualidade do

biogás e de geração de energia elétrica da primeira usina movida a biogás do aterro sanitário do Rio Grande do Sul. Nos anos de 2016, 2017 e 2018 a produção de biogás no aterro teve um aumento substancial, sendo que do primeiro para o último ano o percentual de aumento foi de 33,44%. Já a produção de energia líquida em todos os anos foi de valores acima de 7,0 MWh.

Apesar dos autores da pesquisa considerar como boa a produtividade energética neste aterro, os mesmos autores apontam desafios enfrentados que não são apenas pontuais. Um desses desafios é a qualidade do biogás produzido, já que uma mistura gasosa bem diversificada pode aumentar o custo na separação do metano. Outro ponto a se considerar é a necessidade de uma produção contínua de biogás, para que não haja grandes interrupções na geração de energia. E como os autores bem destacam, o aterro entrou em funcionamento anos antes da instalação da usina, o que significa que já havia matéria orgânica sendo degradada a um bom tempo, e conseqüentemente biogás.

Silva (2018) esclarece que a produção de biogás nos aterros sanitários vai iniciar logo nos primeiros meses após o depósito dos RSU, e essa formação vai perdurar por aproximadamente mais trinta anos, sendo que sua distribuição e concentração do gás metano variam de acordo com a composição, a idade e a umidade dos resíduos, as condições de temperatura e de pH. Apesar da produção de biogás logo nos primeiros meses, a exploração do biogás para a produção de energia só ocorrerá anos após a instalação do aterro sanitário.

Há também a possibilidade do biogás recuperado atender as próprias necessidades do estabelecimento. Andrade (2022) estimando a produção energética a partir da produção de biogás no aterro sanitário de Belém do Brejo do Cruz – PB, concluiu que a produção energética no estabelecimento seria capaz de suprir a necessidade do aterro, e também produzir excedentes.

4 Conclusões

Há uma vasta quantidade de trabalhos científicos que abordam a viabilidade do resgate de metano produzido em aterros sanitários para a produção de energia. Tomando como base modelos matemáticos é possível chegar a ótimas projeções ao longo das décadas para a produção de biogás. O biogás quando caracterizado nos mais diversos aterros pesquisados sempre apresenta um padrão em termo de proporção para os dois principais constituinte, CH_4 e CO_2 , variando apenas em gases de enxofre e nitrogênio. Há casos de usinas instaladas em aterros que passaram a funcionar e aproveitar o gás produzido nesses locais de forma que obtivesse sucesso relativo para este fim.

É importante que se entenda que o biogás vai apresentar maior rentabilidade energética quanto maior o seu grau de pureza, ou seja, menor quantidade de gases tóxicos e corrosivos, e depois livre de interferentes que possam diminuir seu poder calorífico, como é o caso do dióxido de carbono, segundo maior constituinte. Dessa forma, se faz necessário uma purificação pelo menos parcial do biogás, o que aumentaria consideravelmente os custos associados à produção de energia térmica a partir do gás de aterro.

Outro ponto a se levar em consideração é que o biogás só é formado depois de um tempo da instalação do aterro, já que a matéria orgânica precisa ser degradada para que

haja esse suprimento inicial, dessa forma aterros que são instalados em determinada época só poderão trabalhar com geração distribuída anos depois. Assim o suprimento de RSU ao aterro precisa ser constante, levando em consideração uma proporção dos seus constituintes com certa constância, já que sendo diferente disso pode haver interrupção na geração de biogás, o que consequentemente pode gerar paradas na usina que produz a energia a partir do metano. Estes são alguns contratempos a serem observados. Pré-tratamentos químicos e biológicos podem contornar esses percalços.

Outras pesquisas podem complementar o presente trabalho, por meio de análises de campo em diferentes aterros que estejam utilizando, ou passaram a utilizar o biogás para a geração de energia. Modelos matemáticos, como do IPCC, podem oferecer boas estimativas para a produção de metano e do potencial energético de cada aterro em particular.

Referências

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>. Acesso em: 22 de mar. 2022.

ALVES, I. de A.; ROLIM, E. M. Estimativa teórica da emissão de metano e geração de biogás no lixão municipal de Itacoatiara/AM: utilizando modelo de decaimento de primeira ordem. *In*: SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, XIII, 2019, Itacoatiara. **Anais...** Itacoatiara: Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, 2019.

ANDRADE, A. B. Z. **Análise da viabilidade econômica para geração de energia elétrica através do uso do biogás gerado em aterro sanitário no estado da Paraíba**. 2022. 12f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<https://www.cocel.com.br/wp-content/uploads/2014/12/Resolu%C3%A7%C3%A3o-Aneel-482-de-17-de-abril-de-2012.pdf>>. Acesso em: 29 de abr. 2022.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída**. 25 de set. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>. Acesso em: 17 de out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419/1992. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Disponível em: <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-8.419-NB-843-Apresentac%C3%A3o-de-Projetos-de-Aterros-Sanitarios-RSU.pdf>. Acesso em: 12 de mar. 2022.

AZEVEDO, J. PORTAL E-CYCLE. **Aterro sanitário: o que é, impactos e soluções.** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/aterro-sanitario/>. Acesso em: 12 de mar. 2022.

AWADA, B. W. G. **Estimativa da geração de biogás e do potencial energético:** estudo de caso no aterro sanitário do município de Campo Mourão Paraná. Orientador: Prof. Dr. Thiago Morais de Castro. 2020. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Departamento Acadêmico de Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus, Campo Mourão, 2020.

BORGES, P. B.; RANGEL, M. S.; SANTOS, I. F. S. dos. Análise comparativa e avaliação do potencial de produção de biogás na ETE e aterro sanitário de Itajubá (MG). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 3, p. 278 – 292, 2016.

BORGES, H. D. **Avaliação da produção de biogás gerado no reator UASB da estação de tratamento de esgotos sanitários Paranoá – DF.** Orientadora: Ariuska Karla Barbosa Amorim. 2016. 30f. Monografia (Bacharel) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BRASIL. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

BRASIL. DECRETO Nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.043-de-13-de-abril-de-2022-393566799>>. Acesso em: 10 de mai. 2022.

CARDOSO, L. M.; SOUZA, P. L. de; SILVA, T. N. Panorama operacional e os desafios da primeira usina termoeletrica movida a biogás de aterro sanitário do estado do Rio Grande Do Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, II, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Bauru: IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e Saneamento, 2019.

COELHO, T. C.; ALENCAR, R.; OLIVEIRA, R. M. S. de. Estimativa da produção teórica do metano gerado no aterro sanitário de Palmas – TO. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 07, n. 12, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986.** Define as situações e estabelece os requisitos e condições para desenvolvimento de Estudo de Impacto Ambiental – EIA e respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, Brasil.

CROVADOR, M. I. C. **Potencial de geração de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.** Orientador: Prof. Dr. Waldir Nagel Schirmer. 2014. 59f. Dissertação (Mestre em Bioenergia) - Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2014.

CROVADOR, M. I. C.; SCHIRMER, W. N.; MARTINS, K. G.; FRANQUETO, R.; JUCÁ, J. F. T. Estimativa da produção de biogás em aterro sanitário subtropical brasileiro. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá (PR)**, v. 11, n. 1, p. 227-251, jan./mar. 2018.

EIDAM, E. L. **Efeitos de seleção preliminar de resíduos sólidos urbanos na produção de biogás em aterros sanitários**: estudo de caso em Ponta Grossa, Paraná Brasil. Orientador: Felipe Souza Marques. 2019. 12f. Trabalho de Conclusão De Curso (Especialização) - Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental**. Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões. 2009. Dissertação (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FOCUS. ENERGIA PARA A VIDA. 2021. **O que é Geração Distribuída: descubra suas vantagens**. Disponível em: <<https://www.focusenergia.com.br/o-que-e-geracao-distribuida-descubra-suas-vantagens/#:-:text=Gera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADa%20%C3%A9%20o%20termo, trazendo%20in%C3%BAmeros%20benef%C3%ADcios%20aos%20consumidores>>. Acesso em: 14 de mai. 2022.

GOMES, K. C.; LYRA, F. R. As práticas de consumo do movimento lixo zero à luz da teoria de cultura do consumidor. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 22, 2020, São Paulo, **Anais...** São Paulo: Departamento de Administração da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA/USP), com apoio da Fundação Instituto de Administração (FIA), 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/revised-1996-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>>. Acesso em: 02 de mai. 2022.

LANDIM, A. L. P. E.; AZEVEDO, L. P. de. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários**: unindo o inútil ao sustentável. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-100, mar. 2008.

LYRA, G. B.; CARVALHO, A. L. de; LYRA, G. B.; MAIA, S. M. F.; SANTOS, L. R.; MAGALHÃES, I. D.; COSTA, T. S.; CANTARELLI, C. L. D. Estimativa de geração de biogás em aterro sanitário no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, n.7, P. 2276-2286, 2018.

MACEDO, M. B. de P. **Avaliação do potencial de geração de biogás no aterro controlado do jôquei clube de Brasília/DF**. Orientador: Prof. André Luís Brasil

Cavalcante, D.Sc. 2019. 67f. Monografia (Bacharel Em Engenharia Ambiental) - Departamento De Engenharia Civil E Ambiental, Faculdade De Tecnologia, Universidade De Brasília, Brasília, 2019.

MARREIRA, J. A. **Tecnologias de geração distribuída utilizando biogás da rota de resíduos orgânicos: aspectos normativos e modelagem.** Orientador: Ronaldo Stefanutti. 2021. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel) - Curso de Engenheiro de Energias Renováveis, Departamento De Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, 2021.

MELLO, A. R.; GRASSI, R. **Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão – PR.** Orientador: Henrique Cesar Almeida. 2014. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel) - Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental da UTFPR, Campus Francisco Beltrão, 2014.

MÉLO-SCHLUB, A. C.; SILVA, L. A. de O. da; HOLANDA, S. H. de B.; FIRMO, A. L. B. JUCÁ, J. F. T. Resíduos sólidos urbanos: potencial fonte de carbono para degradação microbiana e produção de biogás. **Brazilian Journal of Develop.**, Curitiba, ISSN 2525-8761, v. 5, n. 8, p. 11927-11942 aug. 2019.

NASCIMENTO, D. P. do; CHACARTEGUI, R. CARVALHO, M. Aplicação do método ipcc para estimação da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa/PB. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS NATURAIS DO SEMIÁRIDO – SBRNS, III, 2017, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Grupo de Pesquisa e Extensão de Manejo de Água e Solo no Semiárido, 2017.

NECKER, H. S.; ROSA, A. L. D. Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná – RO. **Revista Eletronica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET**, e-ISSN 2236 1170, v. 17, n. 17, Dez. 2013, p. 3416-3424, 2013.

NEPOMOCENO, T. A. R.; PONTAROLO, E. L. Panorama brasileiro do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos para a geração de biogás em áreas de aterro sanitário. **International Journal of Environmental Resilience Research and Science.** ISSN 2675 3456 - v. 4, n. 2, 2022.

OLIVEIRA, M. G. N. de; CRUZ, M. A. L.; FERREIRA, T. **Impactos causados pelo uso dos combustíveis fósseis e o uso do biocombustível como solução viável.** Orientador: Valdirene O. P. Valdo. 2021. 07f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Técnico de Química, ETEC Benedito Storani, 2021.

PANORAMA DO BIOGÁS NO BRASIL. 2021. **Panorama do Biogás no Brasil 2020.** Foz do Iguaçu, Março de 2021. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/>

uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1_1.pdf.
Acesso: 26 de abr. 2022.

PAULINO, R. S.; SILVA, J. C. da; SANTOS, J. C. P. dos; BRASIL FILHO, P. H.
Potencial Energético do Biogás gerado em Estação de Tratamento de Esgoto. **Revista Conjecturas**, ISSN: 1657-5830, v. 22, n. 2, 2022.

PERSSON, M., JÖNSSON, O., WELLINGER, A. **Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection**. IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas, 2016.

SANTOS, A. C. **Geração de metano devido à digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos – Estudo de caso do aterro sanitário metropolitano centro, Salvador – BA**. Orientador: Sandro Lemos Machado. 2011. 78f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

SANTOS, M. M. de O. **Geração de Biogás em Aterros Sanitários**: Uma análise sobre os modelos de previsão aplicados a projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Orientador: Prof. Celso Romanel. 2014. 57f. Dissertação (Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2014.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS - SEMARH-AL. **Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: <http://www.residuossolidos.al.gov.br/sistemas/aterro-sanitario>. Acesso em: 23 de mar. 2022.

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N. de; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.18 n.2, p. 95-104, abr/jun 2013.

SILVA, J. A. L da. **Aproveitamento energético de biogás no aterro sanitário de Goiânia, Goiás**. Orientador: Joyce Costa Gomes de Santana. 2018. 18f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Curso de Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE – Campus Fortaleza, Fortaleza, 2018.

SILVA, C. de O.; KONRAD, O.; CALLADO, N. H.; MARDER, M.; ARAÚJO, L. G. S. de. Geração quantitativa e qualitativa da emissão de biogás no aterro sanitário de Maceió. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.5, ago/set 2020.

SOUZA, G. A. de. **Estimativa da produção de biogás no antigo lixão do Itacorubi, Florianópolis/SC**. Orientador: Prof. Dr. Alexandre R. Cabral. 2009. 30f. Trabalho de

Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VINIL, S. **Integrated Solid Waste Management: Engineering principles and management issues**. Washington: McGraw-Hill, 1993.

TEIXEIRA, C. E.; TORVES, J. C.; FINOTTI, A. R.; FEDRIZZI, F.; MARINHO, F. A. M.; TEIXEIRA, P. F. Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.14 n.1, p. 99-108, jan/mar 2009.

VIEIRA, G. E. G.; CAMPOS, C. E. A.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, p. 101-220, jul./dez. 2015.

ZANK, J. C. C.; BRANDT, L. S.; BEZERRA, R. C.; PEREIRA, E. N. As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis. **Revista Exacta**, v. 18, n. 3, p. 502-516, jul./set. 2020.

ZAVARISE, J. P.; PPIMASSONI, Y. S.; PINOTTI, L. M.; LEMOS, E. C. L. Emissões teóricas de aterro e seu aproveitamento energético no Brasil: um estudo bibliométrico. **Latin American Journal of Energy Research** – Lajer, v. 8, n. 1, p. 96–108, 2021.