

053 – PRODUÇÃO E APROVEITAMENTO DO BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS LOCALIZADOS NO BRASIL, ESTADOS UNIDOS E PORTUGAL

Ana Carolina Correia de Oliveira Gomes⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade do Oeste Paulista. Mestre em Recursos Naturais pela Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Professora do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul.

Ronaldo Stefanutti⁽²⁾

Professor associado no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Coordenador do Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes (LARSE), parceria NUTEC/UFC. Professor na Pós-Graduação Engenharia Civil do DEHA/UFC - área concentração Saneamento Ambiental.

Debora Nery de Souza⁽³⁾

Graduada em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus Juazeiro do Norte. Mestra em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e doutoranda em Engenharia Civil (Saneamento) pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Edilson Holanda Costa Filho⁽⁴⁾

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará, mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará, especialista em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico pela Faculdade Integrada do Ceará e doutorando em Alterações Climáticas e Políticas de Desenvolvimento Sustentável pela Universidade de Lisboa em cotutela com a Universidade Federal do Ceará.

Geisa Viera Vasconcelos Magalhães⁽⁵⁾

Graduada em Química. Mestre em Engenharia civil/Saneamento Ambiental, Doutora Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Especialista em planejamento e Gestão Ambiental. Pesquisadora do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC).

Endereço⁽¹⁾: Rodovia Dourados/Itahum, km12 – Zona Rural - Dourados - MS - CEP: 79804-970 - Brasil - Tel: (67) 3902-2543 - e-mail: acoliveira@uems.br

RESUMO

O aterro sanitário é uma forma de destinação de resíduos sólidos amplamente utilizada, principalmente em países em desenvolvimento. O biogás gerado na digestão anaeróbica do aterro sanitário é um gás de efeito estufa que pode contribuir para as alterações climáticas; entretanto seu aproveitamento energético mitiga esses possíveis impactos ambientais oriundos da disposição incorreta do biogás e produz combustível renovável. Portanto, nota-se a necessidade da recuperação do biogás gerado em aterros sanitários e o presente trabalho visa analisar a geração e o aproveitamento do biogás produzido em aterros sanitários localizados no Brasil, Estados Unidos e Portugal. O levantamento de dados foi realizado em plataformas de bancos de dados oficiais do governo e empresas responsáveis pelo gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Então foram selecionados os aterros de resíduos não perigosos que receberam maiores quantidades de material na última coleta e continham informações sobre o tamanho, quantidade de resíduos sólidos recebidos, caracterização dos resíduos sólidos, produção do metano e forma de aproveitamento do mesmo. Dos aterros sanitários pesquisados, os que geram maior quantidade de biogás estão localizados nos EUA, seguido pelo Brasil e Portugal, respectivamente. Nos três países estudados há o aproveitamento energético do biogás gerado, entretanto em Portugal apenas 33% dos resíduos são encaminhados para aterro, sendo que estes são compostos majoritariamente de resíduos inertes. Já os EUA e Brasil aproveitam apenas uma fração do biogás gerado devendo haver investimento para evitar o escape do biogás para a atmosfera, captação e transformação afim de aumentar o aproveitamento energético do biogás.

PALAVRAS-CHAVE: Biometano. Resíduos sólidos. Energia renovável. Aterro sanitário. Gases de efeito estufa.

INTRODUÇÃO

A disposição final inadequada de resíduos sólidos causa diversos impactos ambientais negativos. Na tentativa de minimizar esses impactos, a destinação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários é uma das soluções mais utilizadas nos países em desenvolvimento (SANTOS, G. O. *et al.*, 2019; ZAVARISE *et al.*, 2021).

Um aterro sanitário nada mais é do que um reator onde ocorrem reações catalisadas por agentes físicos, químicos e biológicos que, sob influência também das condições externas, resultam na degradação da matéria orgânica lá depositada e na geração de lixiviados e gases. Especificamente sobre o biogás gerado nos aterros sanitários, trata-se de uma mistura gasosa gerada através do processo de digestão anaeróbica da matéria orgânica, composto, principalmente, por metano (40–60%), dióxido de carbono (30–45%) e outros gases (H_2 , N_2 e H_2S) em pequenas quantidades, sendo que sua composição varia de acordo com a composição do resíduo de partida.

O biogás é um gás poluente, que pode contribuir para o agravamento das alterações climáticas, cujas consequências já são sentidas em todo o planeta (LINARD, 2010; SANTOS, G. O. *et al.*, 2019; ZAVARISE *et al.*, 2021). De acordo com Borba *et al.*, (2018), a emissão do metano (CH_4) no setor dos resíduos equivale a 18% das emissões antropogênicas de CH_4 em todo o mundo.

Apesar destes gases serem contribuintes para a mudança climática global, as emissões advindas dos aterros não devem ser atribuídas ao mesmo, pois seriam emitidas como resultado da decomposição natural dos resíduos orgânicos mesmo fora do aterro (EPA, 2021a), a não ser que estes sejam submetidos a algum outro tratamento, como a compostagem. De qualquer forma, os Gases de Efeito Estufa (GEE) são produzidos em aterros e podem gerar impactos ambientais negativos que devem ser prevenidos e mitigados.

O aproveitamento energético do biogás de aterro e seus derivados pode ser usado como combustível para a geração de energia elétrica, incorporado diretamente às redes de gás natural, utilizado como carburante de uso veicular e aplicado para incineração de materiais perigosos e contaminantes dentro do próprio aterro (ZAVARISE *et al.*, 2021). Portanto, nota-se a necessidade da recuperação do biogás gerado em aterros sanitários e o presente trabalho visa analisar a geração e o aproveitamento do biogás produzido em aterros sanitários localizados no Brasil, Estados Unidos e Portugal.

MATERIAIS E MÉTODOS

Em bancos de dados oficiais do governo e das empresas responsáveis pelo gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, foram obtidas informações de aterros sanitários no Brasil, Portugal e EUA.

As informações coletadas foram tabuladas no programa Excel aonde foram empregados critérios de exclusão e inclusão para seleção dos aterros. Como critérios de exclusão, foram desconsiderados aterros sanitários que não possuíam aproveitamento do biogás e àqueles que contém resíduos perigosos. Foram então selecionados os aterros que receberam maior quantidade de resíduos sólidos na última coleta de dados de cada país e aqueles que continham informações sobre o tamanho, quantidade de resíduos sólidos recebidos, caracterização dos resíduos sólidos, produção do metano e forma de aproveitamento do mesmo. Após critérios de exclusão e inclusão foram selecionados quatro aterros sanitários dos EUA, três de Portugal e três do Brasil e descritas as características através de tabelas e quadros.

RESULTADOS

No Brasil existem diversos projetos de recuperação de biogás de aterro sanitário. De 2013 a 2019 foram contabilizados 49 projetos e esses aterros foram responsáveis pela recuperação de cerca de 11 MtCO₂ equivalente em 2019, cerca 15% do total de emissões do subsetor. Desde 2013, 117 milhões de toneladas de CO₂ equivalente foram recuperadas por meio da queima ou do aproveitamento energético do biogás (SEEG, 2020).

Do total de projetos brasileiros de MDL voltados à captação de biogás, 52% são voltados à geração de energia elétrica e biometano, 14% à queima do biogás em flares enclausurados, com possibilidade futura de gerar energia elétrica ou biometano e 34% somente à queima do biogás (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Os EUA possuem mais de 2600 aterros (EPA, 2021b) os quais recebem, dentre outros resíduos, metade dos resíduos sólidos urbanos produzidos no país (EPA, 2018). A utilização do biogás produzido nestes aterros ocorre através da geração de eletricidade, gás natural renovável, uso direto do gás médio, térmica direta, motor alternativo, cogeração, caldeira, ciclo combinado, evaporação de condensado, célula de combustível, turbina a gás, estufa, industrial, evaporação do lixiviado, microturbina, motor alternativo, turbina a vapor, combustível veicular, dentre outros (EPA, 2021c).

Em 2019 foram produzidos em Portugal cerca de 5.281 milhões de toneladas de RSU, um acréscimo de mais 1% com relação a 2018. Deste total, 33% foram encaminhados para aterros, 24% para tratamento mecânico e biológico, 19% para valorização energética, 11% para valorização material, 9% para tratamento mecânico e 2% para valorização orgânica (APA, 2021).

Quanto à produção de biogás em Portugal, o setor de resíduos representa cerca de 46%, quando comparado aos setores de águas residuais, pecuária e indústria alimentícia (FERREIRA; MARQUES; MALICO, 2012). De acordo com dados do projeto Energias Endógenas de Portugal (E2P), estima-se um total de 28 aterros sanitários que utilizam o aproveitamento do biogás produzido para a geração de energia no país (E2P, 2021).

O Figura 1 compara a quantidade de resíduos destinados, pelo período de um ano, aos aterros sanitários pesquisados do Brasil, EUA e Portugal. Os aterros CTR BR 040 e Aterro de Bandeirantes estão desativados desde 2007, enquanto o Antigo Aterro Sanitário de Aveiro e o Antigo Aterro Sanitário de Coimbra estão desativados desde 2012, mas ainda continuam a produzir e utilizar o biogás para a geração de energia elétrica. Apesar dos aterros ainda produzirem biogás mesmo desativados, de acordo com MOTA *et al.*, (2020), a produção nesta fase tende a ser lenta e reduzida em comparação a fase metanogênica.

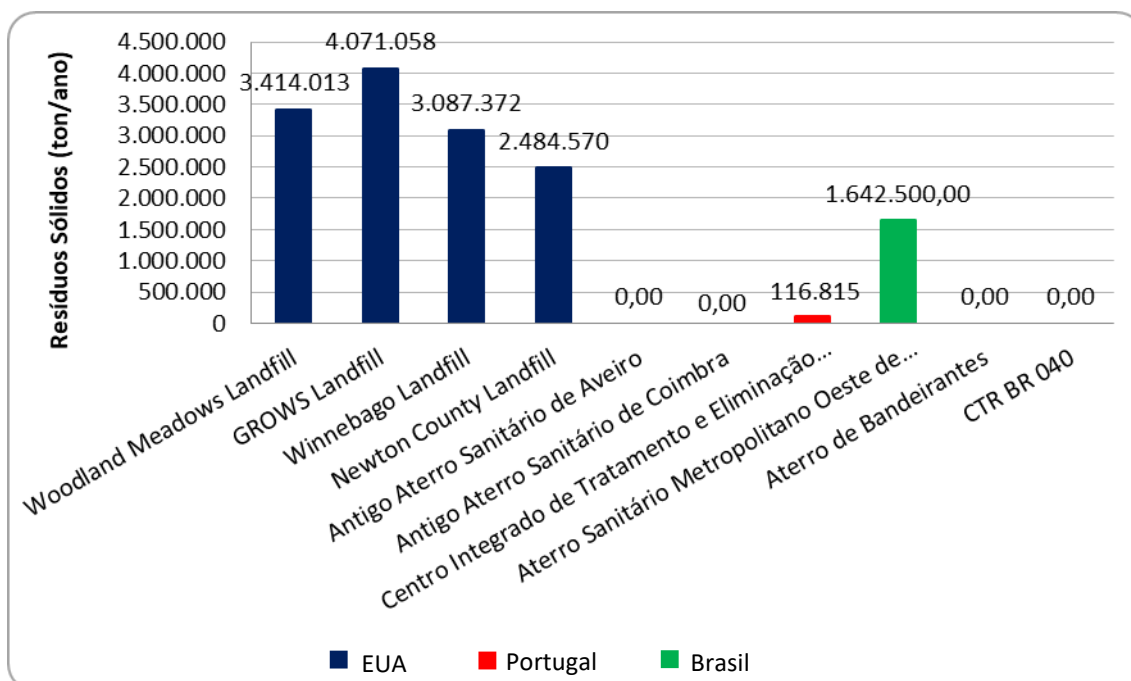


Figura 1: Quantidade de resíduos sólidos depositados por um ano

Dos aterros sanitários pesquisados, os que geram maior quantidade de biogás estão localizados nos EUA (Figura 2), seguido pelo Brasil e Portugal, respectivamente. Ao analisar o Figura 2 e a Tabela 1, que traz um compilado das informações referentes a idade dos aterros e destinação do biogás produzido, é possível perceber que tanto nos aterros brasileiros quanto nos americanos a produção de biogás é diretamente

proporcional à quantidade de resíduos aterrados, ou seja, quanto mais resíduos dispostos em cada aterro, maior é a geração de biogás.

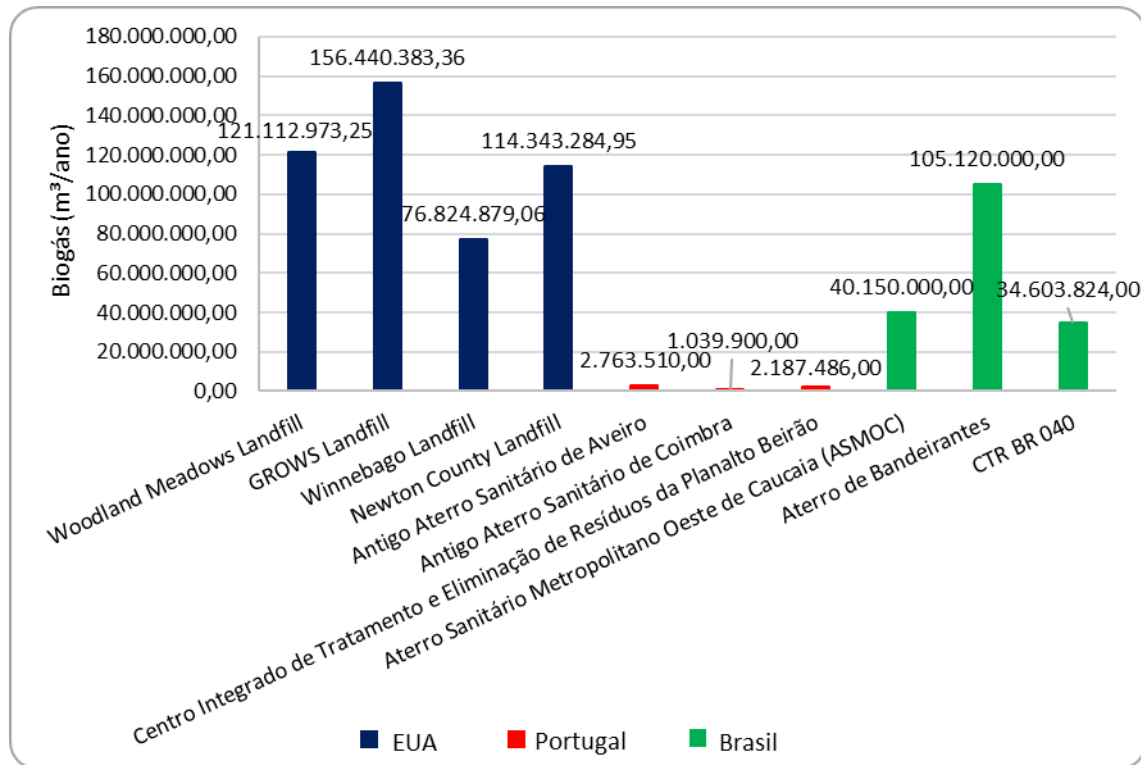


Figura 2: Quantidade de Biogás produzido em cada aterro por um ano

Tabela 1: Destinação do biogás produzido em aterros sanitários nos EUA, Brasil e Portugal

Aterro	País	Localização	Idade (anos)	Tamanho (ha)	Destinação do metano produzido	Status atual do aterro	Quantidade de resíduo aterrado (ton)
Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC)	Brasil	Caucaia (Ceará)	31	120,00	Gás Natural	Operando	32.173.932 ⁽¹⁾
CTR BR 040		Belo Horizonte (Minas Gerais)	46	100,00	Energia Elétrica	Desativado desde 2007	6.000.000 ⁽⁵⁾
Aterro de Bandeirantes		São Paulo (São Paulo)	42	140,00	Energia Elétrica	Desativado desde 2007	35.000.000 ⁽⁵⁾
Antigo Aterro Sanitário de Aveiro	Portugal	Taboeira (Aveiro)	14	19,00	Energia Elétrica	Desativado desde 2012	-
Antigo Aterro Sanitário de Coimbra		Taveiro (Coimbra)	14	16,00	Energia Elétrica	Desativado desde 2012	-
Centro Integrado de Tratamento e Eliminação de Resíduos da Planalto Beirão		Tondela (Viseu)	22	41,40	Energia Elétrica	Operando	-
Woodland Meadows Landfill	Estados Unidos da América	Wayne (Michigan)	27	114,53	Gás Natural	Operando	56.080.525 ⁽³⁾
GROWS Landfill		Morrisville (Pennsylvania)	-	127,88	Energia Elétrica	Operando	65.613.970 ⁽⁴⁾
Winnebago Landfill		Rockford (Illinois)	49	29,54	Energia Elétrica	Operando	23.175.993 ⁽³⁾
Newton County Landfill		Brook (Indiana)	-	171,59	Energia Térmica	Operando	51.889.435 ⁽³⁾

- Dados não encontrados; ⁽¹⁾Últimos dados disponíveis referentes ao ano de 2021; ⁽²⁾Últimos dados disponíveis referentes ao ano de 2020; ⁽³⁾Últimos dados disponíveis referentes ao ano de 2019; ⁽⁴⁾Últimos dados disponíveis referentes ao ano de 2016; ⁽⁵⁾Últimos dados disponíveis referentes ao ano de 2007.

Fonte: Autoria própria, 2023.

A tendência esperada é de que quanto maior o tempo de desativação do aterro a quantidade de biogás vá sendo reduzida, entretanto ao analisar o Figura 2 e Tabela 1 é possível perceber que os aterros brasileiros (CTR BR 040 e Aterro de Bandeirantes) que foram desativados em 2007 produzem maior quantidade de biogás do que os aterros portugueses (Antigo Aterro Sanitário de Aveiro e Antigo Aterro Sanitário de Coimbra) que foram

desativados em 2012. Entretanto os países apresentam diferença na destinação de resíduos sólidos em que Portugal cerca de 40% de seus resíduos produzidos são orgânicos e lá existe uma tendência em tratar e valorar os resíduos sólidos urbanos através da compostagem, incineração com recuperação energética ou reciclagem, de tal forma que desde o ano 2000, mais de 30% de seus resíduos eram tratados e/ou valorados e em 2012, mais de 40% (GARCÍA, 2018). Diferentemente da realidade brasileira em que em torno de 50% do volume dos resíduos aterrados são orgânicos (UN ENVIRONMENT, 2017), sendo assim, os aterros brasileiros possuem maior potencial de geração de biogás.

A terceira posição de Portugal já era esperada, tendo em vista que a produção de metano em aterros sanitários é diretamente proporcional à quantidade de resíduos dispostos nesses equipamentos. Entre os países em estudo, Portugal é o que possui menor geração de resíduos. Em 2019, apenas 5.281 milhões de toneladas foram geradas, quantidade muito inferior ao Brasil (79 milhões de toneladas). Além disso, apenas 33% foram encaminhados para aterros sanitários, representando um grande avanço desde 2010, onde eram destinados cerca de 62% dos resíduos gerados (APA, 2021; SANTOS et. al., 2019).

Em Portugal, a redução de resíduos encaminhados para aterros sanitários foi compensada pelo aumento das unidades de tratamento mecânico e biológico, representando, atualmente, cerca de 24% e as unidades para o tratamento mecânico cerca de 9% dos destinos finais adotados para os RSU (APA, 2021). No caso do Aterro Sanitário de Tondela, a baixa geração de biogás pode ser explicada pela menor quantidade de resíduos recebidos por ano, quando comparado aos demais aterros em operação dos países em estudo. Além disso, a maior parte dos resíduos depositados neste aterro são refugos resultantes das unidades de triagem e de tratamento mecânico e biológico, representando cerca de 65%. Esse fator contribui para a redução de matéria orgânica encaminhada para o aterro e, consequentemente, redução da geração de biogás (AMRPB, 2019).

Outro fator importante que pode explicar o baixo aproveitamento do biogás em aterros de Portugal é o caso da valorização energética, representando cerca de 19% do destino dos RSU no país (APA, 2021), sendo resultante da escala dos sistemas de incineração implementados em Lisboa (VALORSUL) e no Porto (LIPOR), onde são tratados grandes quantidades de resíduos dos principais centros urbanos. Ao analisar o destino final direto dos resíduos por sistema de gestão, verifica-se que na VALORSUL (na área Metropolitana de Lisboa – Norte) e LIPOR (na área metropolitana do Porto), a incineração corresponde a cerca de 60% e 80%, respectivamente (FONSECA, 2020).

Os Estados Unidos é o país com maior produção de RSU e maior emissor de GEE dentre os países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Dentre as atividades emissoras de GEE, destacam-se os aterros sanitários. O país já possui grande produção de biogás de aterro, tendo 55% do gás recuperado, sendo esse aproveitado como diferentes formas de energia (ZAVARISE et al., 2021). A escolha da forma de aproveitamento da energia gerada pelo biogás deve levar em consideração a análise técnico-econômica em diferentes cenários (FILHO, 2022).

Quanto ao Brasil, segundo Piñas et al., (2016), o país possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. Do total de energia consumida no país, aquela proveniente de fontes renováveis varia de 61% a 41%, sendo este último o valor mais aproximado do atual, enquanto no mundo 22,2% da energia advém de fontes renováveis e 77,8% de não renováveis. Em termos de compromissos ambientais, pelo Acordo de Paris (ano de 2015), o Brasil se comprometeu a cortar as emissões do país em 37% até 2025 e em 43% até 2030, tendo como referência o ano de 2005 (SANTOS, M. M.; ROMANEL; ELK, VAN, 2017).

Atualmente, no Brasil, o biogás possui capacidade instalada de geração de energia elétrica de 122.250 kW representando, junto com o carvão de resíduo urbano, uma participação de, aproximadamente, 0,08% na matriz elétrica brasileira, conforme relata SOUZA, et al., (2019). De acordo com esse mesmo autor, o Brasil possui um grande potencial de crescimento em relação ao potencial de geração de energia a partir do saneamento como fonte alternativa de energia renovável. No entanto, existem entraves técnicos, tecnológicos e financeiros e déficit no serviço de saneamento básico que impedem o alavancamento dessa fonte como uma matriz limpa, renovável e significativa dentro do mercado energético brasileiro.

No Brasil, em 2019, foram gerados 79 milhões de toneladas de RSU, sendo previsto um acréscimo de 50% em 30 anos (ZAVARISE et al., 2021). A maior parte dos resíduos sólidos urbanos são dispostos em lixões, aterros controlados e aterros sanitários. Uma parte do gás gerado no aterro sanitário atravessa o sistema de cobertura

dos resíduos (camada de solo) e escapa para a atmosfera, mesmo quando o aterro sanitário apresenta um sistema de captação de biogás. Estes não são capazes de captar com muita eficiência (40 a 60%), e parcelas significativas de metano são emitidas ao meio ambiente (BORBA *et al.*, 2018; COSTA *et al.*, 2018; SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N. DE; CANDIANI, 2013). Daí a importância da cobertura dos resíduos, dentre outras variáveis, para a captação e aproveitamento do biogás de aterro sanitário. Todavia, no aterro sanitário Ecoparque Pernambuco (ECOPARQUE, 2023) foi adotado a impermeabilização de fundo e a cobertura com manta de PEAD, o que reduz as fugas de metano para o ambiente.

O governo federal brasileiro, por meio da Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional dos Resíduos Sólidos - PNRS), estabeleceu o fechamento gradual dos lixões, de forma que os aterros sanitários tornaram-se a principal destinação dos resíduos sólidos no país. Como esperado, nos últimos 10 anos, ocorreu um aumento de 30,3% na destinação de resíduos aos aterros sanitários, atingindo 43 milhões de RSU por ano em 2019 (ZAVARISE *et al.*, 2021). Considerando, portanto, ainda a existência de grande quantidade de lixões no Brasil (resíduos não cobertos), conclui-se que o país tem ainda grande potencial para o aproveitamento energético do biogás de aterro. Apesar do forte incentivo, inserido na PNRS, ao aproveitamento energético do biogás, a maioria dos aterros sanitários do Brasil ainda não possuem estrutura para a captação desse gás (ZAVARISE *et al.*, 2021).

O aproveitamento do biogás em energia elétrica é o dominante no país, entretanto de acordo com um estudo realizado por Filho (2022) a venda de biogás para concessionária e o aproveitamento de biogás como fonte de combustível veicular foram economicamente mais viáveis em diferentes cenários. A venda de biogás é realizada no Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC) associado com a Gnr Fortaleza Valorização de Biogás Ltda e a Marquise que realizam a captação, tratamento, purificação e padronização do combustível renovável fornecendo combustível renovável para a Concessionaria de gás do estado do Ceará, CEGAS (SANTOS, G. O. *et al.*, 2019).

No que tange aos incentivos brasileiros, o Governo Federal, por meio da Lei Nº 10.438/2002, também criou o Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA) mas, segundo Nascimento *et al.*, (2019), o País ainda tem poucos projetos implantados para a geração de energia elétrica a partir do biogás, sendo que a maioria dos existentes fazem parte do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

CONCLUSÕES

Existem inúmeras variáveis que interferem na geração de biogás em um aterro fazendo com que a projeção de geração, coleta e aproveitamento seja específica para cada um.

Os aterros brasileiros possuem alto potencial de geração de biogás pela grande quantidade de resíduos orgânicos que são aterrados.

Nos aterros brasileiros e americanos estudados a produção de biogás apresentou-se diretamente proporcional à quantidade de resíduos aterrados.

Os EUA são os que utilizam mais técnicas de aproveitamento de biogás.

Dentre os países estudados, Portugal é o que destina menor quantidade de resíduos sólidos para aterro sanitário.

Nos EUA e Brasil há excedente de biogás não aproveitado, sendo necessário aumentar o aproveitamento energético do mesmo.

Dos dez aterros estudados, sete utilizam o metano para produção de energia elétrica, dois para gás natural e apenas um para energia térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMRPB. *Relatório de Gestão e Conta Gerência 2019*. [S.l: s.n.], 2019.

2. APA. *Energia e Clima – Emissões de Gases com Efeito de Estufa*. Disponível em: <<https://rea.apambiente.pt/content/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa>>. Acesso em: 17 ago. 2021.
3. BORBA, Priscila Falcão de Sá *et al.* Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 23, n. 1, p. 101–111, 2018.
4. COSTA, Magdalena Duarte *et al.* Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 23, n. 1, p. 77–90, 2018.
5. E2P. Base de dados de fontes renováveis de energias. 2021. Disponível em: <<https://e2p.inegi.up.pt/?Lang=PT#Tec1>>. Acesso em: 6 ago. 2021.
6. ECOPARQUE. Os aterros. ECOPARQUE PERNAMBUCO, 2023. Disponível em: <<http://ecoparquepe.com.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2023.
7. EPA. *Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures Report*. EPA, 2018. Disponível em: <<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/advancing-sustainable-materials-management>>.
8. EPA. *Benefits of Landfill Gas Energy Projects*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lmop/benefits-landfill-gas-energy-projects#one>>. Acesso em: 31 ago. 2021a.
9. EPA. *Landfill Technical Data*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lmop/landfill-technical-data>> Acesso em: 31 set. 2021b.
10. EPA. *Project and Landfill Data by State*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lmop/project-and-landfill-data-state>>. Acesso em: 31 set. 2021c.
11. FERREIRA, Miguel; MARQUES, Isabel Paula; MALICO, Isabel. Biogas in Portugal: Status and public policies in a European context. *Energy Policy*, v. 43, n. 2012, p. 267–274, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.003>>.
12. FONSECA, José Manuel Novo. *Valorização Energética de Resíduos para uma Economia Circular: o estado da arte em Portugal*. 2020. Dissertação de Mestrado - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2020.
13. GARCÍA, Diana Melissa Moreira. *Gestão de resíduos sólidos - uma comparação entre Portugal e o Equador*. 2018. Dissertação de mestrado - Faculdade de Economia - Universidade do Porto, Portugal, 2018.
14. LINARD, André de Freitas Gomes. *Análise do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário metropolitano oeste em Caucaia sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo*. 2010. Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2010.
15. MOTA, Francisco Suetônio *et al.* Características Climáticas E Variações Horárias Da Concentração Do Biogás Em Um Aterro Sanitário Localizado No Nordeste Do Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, p. 1–12, 2020.
16. 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 Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 1, p. 143–155, 2019.
17. 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, n. 1, p. 175–188, 2016.
18. SANTOS, Gemelle Oliveira *et al.* Otimização da captação de metano de um aterro sanitário do Nordeste brasileiro. *Revista Princípi*a, p. 204–213, 2019.
19. SANTOS, Mauro Meirelles; ROMANEL, Celso; VAN ELK, Ana Ghislane Henriques Pereira. Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1151–1162, 2017.
20. SEEG. *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970–2019*. Observatório do Clima. [S.l.: s.n.], 2020.
21. SILVA, Tiago Nascimento; DE FREITAS, Fernando Souza Nazareth; CANDIANI, Giovano. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 95–104, 2013.
22. SOUZA, Alessandra Ribeiro De *et al.* Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 5, p. 887–896, 2019.
23. UN ENVIRONMENT. *Organic Waste Management in Latin America : Challenges and Advantages of the Main Treatment Options and Trends*. United Nations: Environment Programme. [S.l.: s.n.], 2017.

24. ZAVARISE, Julio Pansiere *et al.* Emissões teóricas de biogás de aterro e seu aproveitamento energético no Brasil: um estudo bibliométrico. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 8, n. 1, p. 96–108, 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES pela concessão de bolsas para 2 dos autores.