



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2021) v. 8, n. 1, pp. 96–108
<https://doi.org/10.21712/lajer.2021.v8.n1.p96-108>

Emissões teóricas de biogás de aterro e seu aproveitamento energético no Brasil: um estudo bibliométrico

Theoretical emissions of landfill biogas and its energy use in Brazil: a bibliometric study

Julio Pansiere Zavarise^{1*}, Yasmim Sagrillo Pimassoni², Laura Marina Pinotti³, Ediu Carlos Lopes Lemos⁴

¹ Aluno do Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

² Graduanda em Engenharia Química, Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

³ Professora do Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

⁴ Professor do Programa de Pós-graduação em Gestão Ambiental, Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes, Nova Venécia, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: juliopz2011@gmail.com

Received: 06 June 2021 | Accepted: 01 July 2021 | Published online: 11 July 2021

Resumo: A destinação incorreta dos resíduos sólidos urbanos (RSU) causa a emissão de gases do efeito estufa (GEE), como o metano (CH₄). Os aterros sanitários são a principal destinação dos RSU no Brasil e geram o biogás de aterro, o qual pode ser aproveitado para fins energéticos. Para instalar sistemas de recuperação e uso energético do biogás é necessário estimar o volume do gás que será emitido durante a vida útil do aterro. Para isso, pode-se fazer uso de modelos matemáticos, como o LandGEM e o modelo desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, da sigla em inglês). Considerando o crescimento das publicações acerca da valorização energética do biogás de aterro, este estudo teve como objetivo analisar as pesquisas sobre os estudos das emissões teóricas de CH₄ em aterros sanitários brasileiros e seu posterior aproveitamento energético, através de uma análise bibliométrica. Foi observada uma tendência de crescimento no número de publicações no período de 2013 a 2020. A Índia, China e USA são os países que mais publicaram artigos dentro da temática no período de análise. Quanto aos modelos aplicados, observou-se forte preferência pelo modelo LandGEM e por projetos de conversão de biogás em energia elétrica. Destacou-se ainda, o crescimento da geração distribuída de eletricidade por meio do biogás de aterro, o que pode diminuir a dependência da energia hidrelétrica no país.

Palavras-chave: Metano, Geração distribuída, Energia elétrica, Resíduos sólidos, Bibliometria.

Abstract: The incorrect disposal of municipal solid waste (MSW) causes the emission of greenhouse gases (GHG), such as methane (CH₄). Landfills are the main destination of MSW in Brazil and generate landfill biogas, which can be used for energy purposes. To install biogas recovery and energy use systems it is necessary to estimate the volume of gas that will be emitted during the landfill's useful life. For this, it is possible to make use of mathematical models, such as LandGEM and the model developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Considering the growth of publications on the energy valorization of landfill biogas, this study aimed to analyze the research on theoretical CH₄ emissions in Brazilian landfills and its subsequent energy use, through a bibliometric analysis. A growing trend was observed in the number of publications in the period from 2013 to 2020. India, China, and the United States are the countries that most published articles on the subject in the period of analysis. As for the models applied, there was a strong preference for the LandGEM model and for projects to convert biogas into electrical energy. Also noteworthy is the growth of distributed electricity generation from landfill biogas which can reduce the country's dependence on hydroelectric energy.

Keywords: Methane, Distributed generation, Electricity, Solid waste, Bibliometrics.

1. Introdução

O crescimento populacional, o desenvolvimento econômico e o aumento da urbanização resultam em um rápido incremento na produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) (Pisani, Alves de Castro e da Costa, 2018; Pereira e Fernandino, 2019; Da Silva et al., 2020a). Em 2019, foram gerados 79 milhões de toneladas de RSU no Brasil, sendo previsto um acréscimo de 50% em 30 anos (Abrelpe, 2020). Quando não gerenciados corretamente os RSU causam impactos, como a poluição do solo e das águas subterrâneas e a emissão de gases do efeito estufa (GEE), que contribuem ativamente para o aquecimento global (Lino e Ismail, 2018; Lima et al., 2018a).

O governo federal brasileiro, por meio da Lei nº 12.305/2010 (a 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 (Brasil, 2010; Lima et al., 2018b). 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 (Abrelpe, 2020).

Os aterros sanitários são uma das soluções mais utilizadas nos países em desenvolvimento para a eliminação de RSU, como é o caso do Brasil. Isso se dá devido à baixa complexidade técnica, ao baixo investimento necessário e principalmente, ao baixo custo relativo quando comparado a outras formas de tratamento, como a incineração, por exemplo (Alfaia, Costa e Campos, 2017; Lino e Ismail, 2018; Lima et al., 2018b; Da Silva et al., 2020b; Da Silva et al., 2020a). Como uma das desvantagens tem-se a emissão do biogás de aterro, uma das maiores fontes antropogênicas de metano (CH_4) (Dos Santos et al., 2019; SEEG, 2020).

O biogás de aterro ou biogás é uma mistura gasosa gerada através do processo de digestão anaeróbica da matéria orgânica. É composto, principalmente, por metano (40–60%) e dióxido de carbono (30–45%) e outros gases (H_2 , N_2 e H_2S) em pequenas quantidades (Lino e Ismail, 2018; Da Silva et al., 2020b), sendo que sua composição varia de acordo com a composição do resíduo de partida (Freitas et al., 2019). Segundo a Abrelpe (2020), a matéria orgânica (restos de alimentos, principalmente) correspondeu a 45,3% dos RSU que foram gerados no Brasil em 2020 e é a partir dessa fração que o biogás é produzido. Nos aterros sanitários, a digestão anaeróbica da matéria orgânica ocorre em quatro fases: a fase aeróbica, a fase de esgotamento de oxigênio (O_2), a fase anaeróbica e a fase final, tendo como produtos majoritários: o lixiviado e o metano (Lino e Ismail, 2012; Lombardi, Costa e Sirini, 2017; Dalmo et al., 2019).

O CH_4 possui elevado potencial de aquecimento global, sendo sua capacidade de aquecer a Terra de 23 a 28 vezes maior que a do dióxido de carbono (CO_2) (Piñas et al., 2016; Qu et al., 2019). Assim, a captura e o tratamento dos gases emitidos nos aterros sanitários são essenciais para a redução dos danos ambientais causados por essa maneira de disposição dos RSU (Markgraf e Kaza, 2016; Paes et al., 2018). Contudo, no Brasil existem apenas 49 projetos de recuperação do biogás de aterro registrados (Abrelpe, 2020).

O aproveitamento energético do biogás de aterro e seus derivados pode ocorrer em diversas configurações, dentre elas: a geração de energia elétrica (Manasaki et al., 2021); a sua incorporação direta às redes de gás natural (Hoo, Hashim e Ho, 2018); a utilização como combustível de uso veicular (Bezerra e De Alexandria, 2020; Kovalev et al., 2021) e a aplicação para incineração de materiais perigosos e contaminantes dentro do próprio aterro (Zhao et al., 2017).

Para que a recuperação e o aproveitamento energético do biogás sejam realizados são necessários estudos que demonstrem a viabilidade técnica e econômica desses projetos, e para isso é necessário estimar a quantidade de biogás produzido nos aterros através de modelos matemáticos (Qu et al., 2019; Da Silva et al., 2020b).

Os métodos envolvendo modelos matemáticos podem ser baseados em equações de cinética química de diversas ordens (Amini, Reinhart e Mackie, 2012). Os modelos mais utilizados atualmente são modelos de decaimento de primeira ordem, que assumem que a emissão de metano decresce exponencialmente com o tempo de aterramento dos RSU (Aguilar-Virgen et al., 2014; Saghir, Naimi e Tahiri, 2018). Estes consideram a variação anual das emissões de CH_4 com base em dois parâmetros: o potencial de geração (L_0), que depende do tipo de composição dos resíduos e a constante de decaimento (k), que varia de acordo com a umidade, temperatura, pH, tipo de disposição de resíduos e nutrientes para o processo anaeróbio, influenciando a velocidade de geração de biogás (Penteado et al., 2012; Santos, Romanel e Elk, 2017; Da Silva et al., 2020b).

Dentre os modelos de decaimento de primeira ordem pode-se destacar: o modelo IPCC–FOD (2006), desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, da sigla em inglês), e o

modelo LandGEM 3.02 (2005), elaborado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, da sigla em inglês).

O LandGEM é o modelo mais usado para estimar a geração de biogás nos aterros sanitários em escala mundial (Fallahzadeh et al., 2019). Este modelo emprega a quantidade anual de resíduos depositados, porém não distingue as diferentes categorias de resíduos (Gollapalli e Kota, 2018). É considerado simples e direto, possuindo como entradas: k e L_0 , a área e capacidade do aterro, a quantidade anual de resíduos recebidos e o total de anos de operação do aterro (Andriani e Atmaja, 2019; Yodi, Suryawan e Afifah, 2020). Por sua vez, o modelo IPCC–FOD considera os diferentes componentes biodegradáveis presentes nos RSU e o clima da região onde o aterro sanitário está instalado, podendo ser aplicado a diversas regiões, tanto com a utilização de valores tabelados (*default*), quanto com dados específicos (IPCC, 2006; Gollapalli e Kota, 2018; Abdelli et al., 2020).

O aproveitamento energético do biogás de aterro tem atraído diversos estudos com o objetivo de comparar a aplicabilidade dos modelos disponíveis para gerar estimativas em diferentes países e regiões. Sendo assim, torna-se relevante a realização de uma análise bibliométrica para entender o panorama das pesquisas. A análise bibliométrica é utilizada a fim de descrever, avaliar e monitorar as pesquisas publicadas, de maneira objetiva e quantitativa, utilizando ferramentas matemáticas e estatísticas (Sánchez, Rama e García, 2017; Guozhu et al., 2018; Secchim, Freitas e Gonçalves, 2018). Assim, o objetivo deste estudo foi analisar as publicações sobre a aplicação dos modelos matemáticos IPCC–FOD e LandGEM na estimativa e aproveitamento energético do CH_4 , obtido a partir da fração orgânica dos RSU gerados no Brasil. Para tal, foi realizada uma análise bibliométrica (composta por análises quantitativa e qualitativa) das publicações relacionadas. A importância do presente estudo reside no fato de que não foram encontrados trabalhos semelhantes na literatura.

2. Metodologia

A metodologia de análise bibliométrica empregada neste estudo foi adaptada a partir de Zavarise e Pinotti (2020). As bases de dados consultadas foram a Science Citation Index Expanded (SCI–EXPANDED), pertencente à Thomson Reuters, e a Scopus, pertencente à Elsevier. Foram buscados somente artigos originais, excluindo-se os demais tipos de publicações (*reviews, proceedings papers* etc.), sem limitar a data de publicação.

As palavras–chave foram definidas de acordo com o tema principal deste estudo (Margon, Pinotti e Freitas, 2017). A pesquisa foi realizada no dia 01 de maio de 2021. As palavras–chave inseridas foram: “*municipal solid waste*”, “*urban solid waste*”, “IPCC”, “LandGEM”, “*landfill gas*” e “*gas*”, empregando os operadores booleanos ‘AND’ e ‘OR’.

Os resultados obtidos compõem inicialmente, o banco de artigos dos quais foram construídos os gráficos referentes a: publicações por ano (Figura 1), dos países mais produtivos e das revistas mais produtivas (Figuras 2 e 3, respectivamente). Tais gráficos foram apresentados e discutidos na etapa denominada como Análise quantitativa.

Para refinar os resultados foi realizada a leitura completa dos títulos e dos resumos dos artigos do banco de artigos inicial. Os seguintes critérios foram verificados, de forma simultânea: i) se os aterros de RSU estudados estão localizados em território brasileiro e ii) se houve estudo da recuperação e do aproveitamento energético do CH_4 estimado.

Ao fim da Análise quantitativa, os artigos que foram selecionados compuseram o banco de artigos finais e foram discutidos, em uma etapa denominada como Análise qualitativa. Buscou-se analisar as condições de aplicação dos modelos (parâmetros k e L_0 ; localização do aterro; início e tempo de funcionamento dos aterros), além dos resultados de aplicação dos modelos IPCC–FOD ou LandGEM (pico e volume máximo de emissões teóricas de CH_4) e o estudo de aproveitamento energético do biogás estimado. Todas as informações citadas anteriormente foram listadas na Tabela 1.

Por fim, de acordo com as informações coletadas nos artigos discutidos, foi elaborada uma Matriz SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities* e *Threats*). Para Margon, Pinotti e Freitas (2017), a análise SWOT permite uma melhor compreensão dos resultados e a complementação das análises propostas obtidos em uma análise bibliométrica.

Tabela 1. Informações sobre os artigos originais do banco de artigos.

Artigos	Localização do aterro sanitário	Início da deposição de RSU (hipotético)	Vida útil dos aterros	Modelo de estimativas das emissões de CH ₄	Parâmetros		Pico de geração e estimativa máxima de CH ₄	Potência hipotética de geração de energia elétrica
					k	L ₀		
De Brito et al. (2021)	21 consórcios intermunicipais de MG	2018	30 anos	LandGEM 3.02	0.003/ano a 0.21/ano	170 m ³ /t	2048	4577 kW
Souza et al. (2019)	Varginha (MG)	2018	20 anos	LandGEM 3.02	0.05/ano	170 m ³ /t	2038	150 kW
Piñas et al. (2016)	Três Corações (MG)	2015	20 anos	LandGEM 3.02	0.05/ano	170 m ³ /t	2034	242 kW

*NR= Não relatado

3. Bibliometria

3.1. Análise quantitativa

Na busca das palavras-chave referidas anteriormente nas bases de dados SCI-EXPANDED e Scopus retornaram como resultados 95 e 120 artigos originais, respectivamente. Foram identificados 70 artigos duplicados. Assim, o banco de artigos inicial foi composto por 145 publicações. A partir desse portfólio, a Figura 1 foi elaborada e apresenta a quantidade de publicações por ano em cada base de dados e a quantidade total de publicações encontradas.

A média aritmética de publicações no período considerado (1998-2021) foi de aproximadamente 6 artigos/ano, com o pico em 2020, com 19 artigos publicados. O período de 1998 a 2009 foi marcado pela escassez de publicações (vide curva de publicações totais), sendo a soma de todas as publicações nesse intervalo responsável por somente 13% do total. Na Figura 1, observa-se uma tendência geral de crescimento consistente, principalmente a partir de 2013, apesar das flutuações observadas. O ano de 2021 aparece com um baixo número de artigos publicados (comparativamente ao ano anterior), em razão da presente data em que a pesquisa foi realizada.

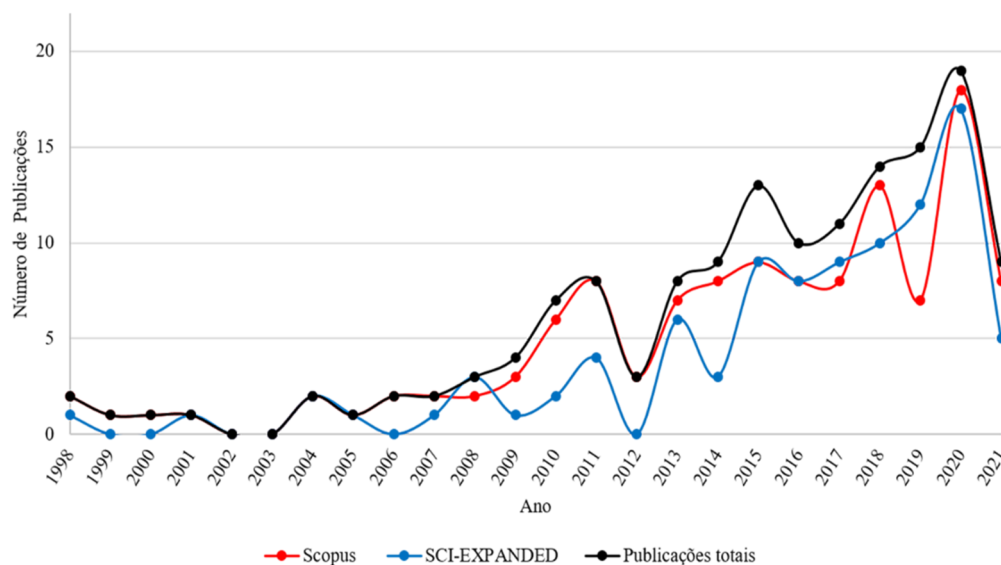


Figura 1. Artigos originais publicados de 1998 a 2021 selecionados com as palavras-chave “municipal solid waste” OR “urban solid waste” AND “IPCC” OR “LandGEM” AND “landfill gas” OR “gas”.

Os artigos originam-se de diversas partes do mundo, sendo os 10 países que mais publicaram artigos relacionados às palavras-chave pesquisadas apresentados na Figura 2. Vale ressaltar que uma publicação pode pertencer a dois ou mais países simultaneamente.

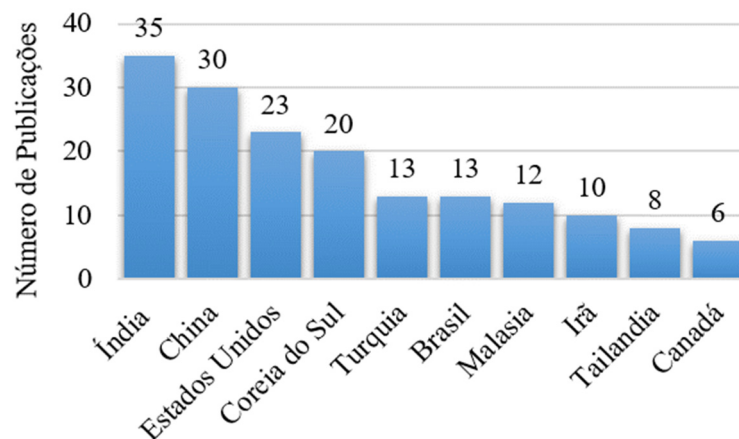


Figura 2. 10 países mais produtivos em artigos originais selecionados com as palavras-chave “municipal solid waste” OR “urban solid waste” AND “IPCC” OR “LandGEM” AND “landfill gas” OR “gas”.

Índia, China e Estados Unidos são os países com o maior número de artigos publicados no período considerado. Estes são os países mais populosos do mundo (The World Bank, 2020). Dado que o volume de RSU está intimamente relacionado com o tamanho da população do local (Choudhary, Kumar e Kumar, 2020), acredita-se que os países citados anteriormente possuem, uma elevada quantidade de RSU para gerir (Lee, Kim e Chong, 2016; Sharma e Chandel, 2021; Xiao et al., 2021).

A Índia e a China possuem economias em franco crescimento, e como consequência, uma demanda de energia crescente (Kumar, 2020; Fan e Hao, 2020). Estes países são dependentes da importação de gás natural, sendo assim a pesquisa e os investimentos na produção de CH₄ é um caminho para a redução da dependência e aumento da segurança energética (IEA, 2020). Na Índia os resíduos sólidos são descartados, em sua maior parte, de forma inadequada e a busca por alternativas ambientalmente corretas se faz necessária (Kumar et al., 2017; Nandan et al., 2017). A China utiliza aterros sanitários como destinação final dos RSU, contudo menos da metade dos aterros existentes possui sistema de coleta de biogás (Liu, Xing e Liu, 2017), justificando a necessidade de estudos relacionados ao tema aqui tratado e a sua posição no ranking da Figura 2.

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 (OCDE, da sigla em inglês). Dentre as atividades emissoras de GEE, destacam-se os aterros sanitários (Lee, Kim e Chong, 2016). O país já possui grande produção de biogás de aterro, tendo 55% do gás recuperado, sendo esse aproveitado como diferentes formas de energia (IEA, 2020). Contudo, sabe-se que são necessários investimentos para mitigar as emissões de GEE em aterros e aperfeiçoar os inventários de emissões de CH₄.

O Brasil aparece em quinto lugar (junto com a Turquia), com 13 publicações. Acredita-se que as primeiras publicações do país em 2012 sejam uma possível consequência da implementação da PNRS. Apesar do forte incentivo, inserido na PNRS, ao aproveitamento energético do biogás, a maioria dos aterros sanitários do país ainda não possuem estrutura para a captura desse gás (Brasil, 2010; Abrelpe, 2020). Tal fato evidencia a necessidade de fomento a pesquisas acerca da aplicação de modelos para estimar a geração de biogás nesses ambientes, podendo este trabalho lançar luz sobre futuras oportunidades a serem exploradas.

Os artigos encontrados estão distribuídos em 47 revistas na base SCI-EXPANDED e 67 revistas na base Scopus, excluindo-se as duplicatas tem-se que os artigos estão divididos entre 85 revistas. As 5 revistas com o maior número de publicações seguem apresentadas na Figura 3.

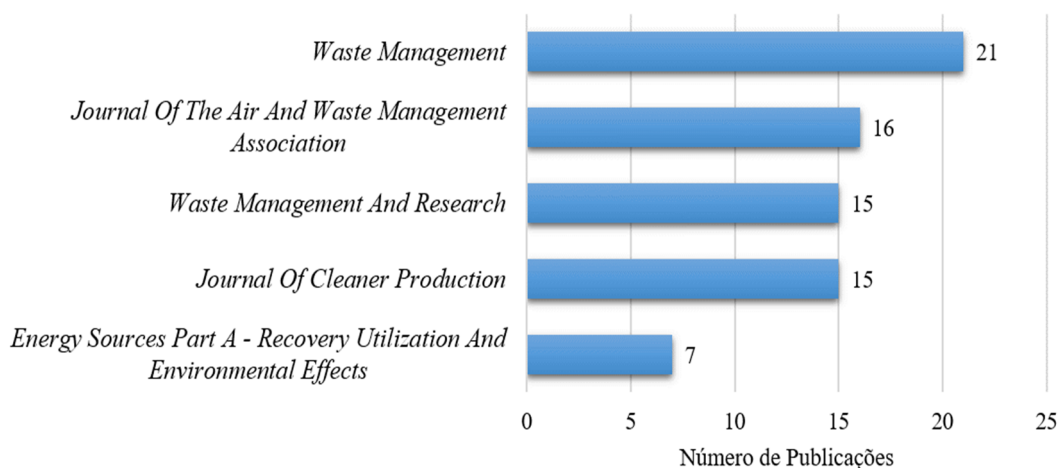


Figura 3. 5 revistas mais produtivas em artigos originais selecionados com as palavras-chave “municipal solid waste” OR “urban solid waste” AND “IPCC” OR “LandGEM” AND “landfill gas” OR “gas”.

As categorias Engenharia Ambiental e Ciências Ambientais da plataforma *Journal Citation Report* (JCR) abrangem as quatro primeiras revistas (mostradas na Figura 3). Estas categorias estão fortemente relacionadas com os estudos voltados para aplicações do biogás de aterro, o que mostra conformidade entre as publicações selecionadas, as revistas e o tema central deste estudo. Ainda na plataforma JCR, os Fatores de Impacto (FI) das revistas em 2019 foram coletados. O FI relaciona o número de citações com o número de artigos publicados, sendo utilizado os dados dos 2 últimos anos dividido pela quantidade de artigos que foram citados, proporcionando maior visibilidade e relevância dos periódicos (Moreto, Porto e Freitas, 2020). Para as 5 revistas que mais publicaram foram encontrados os Fatores de Impacto 5,448; 2,245; 2,771; 7,246 e 1,184 respectivamente. A revista com o maior FI foi a *Journal of Cleaner Production*, que por sua vez, contribuiu com 15 artigos para o portfólio do banco de artigos inicial do presente trabalho.

3.2. Análise qualitativa

Os artigos do banco inicial tiveram os títulos e resumos analisados, sendo identificados 3 artigos que atenderam aos critérios definidos anteriormente. Estes trabalhos compõem o banco de artigos final, e seguem apresentados na Tabela 1.

Nota-se que 100% dos artigos empregaram o modelo LandGEM 3.02 (2005) para as estimativas de emissões de CH₄ em aterros sanitários. Provavelmente, isso se deve ao fato de que o modelo desenvolvido pelo IPCC requer maior qualidade e disponibilidade de dados sobre a composição física dos RSU e sobre a infraestrutura do aterro sanitário (Da Silva, 2020b).

Outro fato que pode ser apontado é que todos os trabalhos elencados na Tabela 1 foram realizados sobre aterros localizados em todo o Estado de Minas Gerais (MG) (De Brito et al., 2021) ou em municípios pertencentes a esse Estado da federação (Souza et al. (2019); Piñas et al. (2016)). Estes 3 trabalhos foram originados a partir da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), sediada em MG, e que possui diversos núcleos de pesquisa voltados a saneamento, sustentabilidade e valorização energética de resíduos sólidos e do biogás de aterro.

Quanto ao aproveitamento energético do biogás de aterro, novamente, todos os 3 trabalhos selecionados escolheram avaliar a geração de energia elétrica. Acredita-se que tal escolha pode estar relacionada à expansão da geração distribuída de energia elétrica no país, incentivada através de legislações e discussões favoráveis ao tema no país, como a Resolução Normativa (REN) n° 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2012; o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProDG) desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia, em 2015, e mais recentemente, em 2018 e 2019, por meio das consultas públicas realizadas pela ANEEL acerca da REN n° 482/2012 (De Andrade et al., 2020).

O estudo de De Brito et al. (2021) estimou o potencial teórico de emissões de CH₄ a partir da matéria orgânica de RSU gerados em 21 dos 27 consórcios intermunicipais de MG. A viabilidade econômica de dois cenários distintos (digestores anaeróbios e aterros sanitários) para o aproveitamento energético do biogás foi avaliada. Para tal, os projetos de recuperação energética pela geração de energia elétrica foram analisados através do Valor Presente Líquido (VPL) e pela Taxa Interna de Retorno (TIR).

Os resultados obtidos, para o ano de 2018 e nas condições definidas, indicaram que 6 dos 21 projetos energéticos do biogás de aterro obtiveram viabilidade econômica, pois a TIR encontrada foi maior que a Taxa Mínima de Retorno do Investimento (TMRI) e o VPL dos investimentos foi positivo. Para o cenário dos digestores anaeróbios não foi previsto um retorno do investimento em nenhum dos projetos estudados. Em resumo, determinou-se que somente os investimentos em projetos energéticos do biogás de aterro se mostraram capazes de pagar o investimento inicial despendido.

Como principais conclusões, o trabalho de De Brito et al. (2021) destaca que os projetos de uso energético do biogás tendem a ser mais viáveis quanto maiores forem os níveis de geração de RSU e os aumentos das tarifas de energia elétrica. Dentro do cenário estudado, somente o uso energético do biogás de aterro apresentou-se viável economicamente. Contudo, o uso de reatores anaeróbios é superior em ganhos ambientais aos aterros sanitários, uma vez que geram subprodutos que podem ser aproveitados como fertilizantes.

Ademais, os autores afirmam que a viabilidade de qualquer projeto deve ser estudada antes da instalação de sistemas de biogás de aterro para geração de energia. A análise de viabilidade realizada pelos autores citados considerou uma taxa de depreciação do capital no tempo, os custos anuais de operação e manutenção, e os benefícios gerados pela economia de energia com a geração elétrica. Este último item foi obtido a partir das estimativas de biogás geradas pelo modelo LandGEM. Tal fato pode indicar a utilidade dos modelos matemáticos de primeira ordem para uma gestão eficiente e estratégica dos aterros sanitários de RSU.

O estudo de Souza et al. (2019) estimou o potencial energético do CH₄ gerado no aterro sanitário de Varginha (MG). Como mostrado na Tabela 1, foi empregado o modelo LandGEM, e análises de viabilidade econômica acerca da conversão de biogás em energia elétrica foram realizadas.

Concluiu-se, após as análises, que somente o aproveitamento de 150 kW torna-se viável de ser empregado (VPL positivo e TIR > TMIR), enquanto a opção de 300 kW se mostrou incapaz de pagar sequer o investimento inicial. A população atual estimada de Varginha é de 136.602 habitantes (IBGE, 2020), que é semelhante à população de saturação calculada pelos autores, sendo esta última igual a 139.759 habitantes. Portanto, o volume dos RSU gerado já se encontra próximo ao limiar de saturação, definido pelos autores citados, e inviabiliza projetos de aproveitamento energético ambiciosos, considerando que a extensão do projeto deve ter paridade com as projeções de geração do CH₄ durante toda a vida útil do aterro.

O uso do LandGEM permite traçar estratégias satisfatórias de forma prática e de baixo custo. Entretanto, é preciso ponderar que esse modelo pode, em alguns casos, gerar estimativas distantes da realidade do aterro, além de apresentar maiores chances de erro, frente ao modelo desenvolvido pelo IPCC, por exemplo, uma vez que não considera a influência da composição física dos RSU. Penteado et al. (2012) avaliaram a vazão de biogás em um aterro próximo a Paulínia no Estado de São Paulo utilizando o modelo IPCC. Os autores realizaram as avaliações em duas abordagens: com e sem o conhecimento da composição do resíduo. Os autores concluem que o conhecimento sobre a composição dos RSU é de extrema importância para uma previsão mais próxima à realidade.

O projeto do aterro de Varginha, segundo Souza et al. (2019) é caracterizado como uma minigeração distribuída, por produzir entre 75 kW e 5 MW de potência instalada. Como é sabido, a energia elétrica é um insumo de papel fundamental no desenvolvimento econômico das cidades (De Andrade et al., 2020). Nesse contexto, é preciso atentar para a expansão da geração distribuída de eletricidade no Brasil e sua provável relação com o aproveitamento energético do biogás de aterro.

A geração distribuída de energia elétrica pode trazer inúmeros benefícios ao modernizar o modelo tradicional, como a redução dos custos de transmissão, manutenção dos sistemas e impostos setoriais, das próprias tarifas da energia elétrica, além de reduzir os impactos ambientais causados pelas usinas tradicionais de energia elétrica, usualmente localizadas longe dos centros consumidores (Celeste et al., 2016; De Andrade et al., 2020). Para implementar os projetos energéticos movidos a biogás no Brasil, é fundamental que o governo incentive as já existentes políticas energéticas do setor e forneça subsídios econômicos (Freitas et al., 2019).

O trabalho de Piñas et al. (2016) abordou a geração de energia elétrica em motores de combustão interna a pistão a partir do biogás de aterro, na cidade de Três Corações (MG). Foram realizadas estimativas das emissões de CH₄ com os modelos LandGEM e Biogás (Cetesb).

Os resultados apontaram uma variação entre os modelos de apenas 5.4% para as energias acumuladas geradas a partir do biogás. Os autores atribuem que os resultados similares se devem ao fato de ambos os modelos serem lineares, o que pode indicar que a utilização de modelos de decaimento de primeira ordem, como o LandGEM, IPCC–FOD e o Biogás, podem ser empregados sem distinção, considerando que a qualidade e a disponibilidade dos dados de entrada sejam adequadas para suprir as exigências dos modelos a serem empregados.

Por fim, Piñas et al. (2016) concluíram que a conversão do biogás em energia elétrica, acumula os benefícios da mitigação de emissões de GEE e a redução dos custos associados com o suprimento de energia elétrica para o funcionamento dos aterros sanitários. Embora não tenha sido abordado nos trabalhos listados na Tabela 1, é possível realizar o aproveitamento energético do biogás via geração de vapor e como combustível para caldeiras (Brasil, 2010; EPE, 2018). Ademais, como foi pontuado por Piñas et al. (2016), após ser purificado e enriquecido (pela remoção parcial do CO₂), desumidificado e comprimido, o biogás passa a ser denominado como biometano, e pode ser usado para a geração de calor, para abastecimento dos gasodutos das concessionárias de distribuição de gás canalizado e, principalmente, pode vir a complementar as redes locais de gás natural (EPE, 2018; Neto, 2017).

A fim de sumarizar as discussões levantadas neste estudo bibliométrico, a matriz SWOT foi elaborada e segue apresentada no Quadro 1. A matriz SWOT apresenta os fatores internos (pontos positivos e pontos negativos) e fatores externos (oportunidades e ameaças) à aplicação dos modelos matemáticos de estimativas de teóricas de biogás de aterro no Brasil.

3.3. Limitações da pesquisa

Após as análises realizadas somente 3 artigos se enquadraram nos critérios definidos, o que representou apenas 2% do total de publicações sem repetições. A escassez de trabalhos publicados limitou a extensão das conclusões obtidas neste estudo e demonstrou a necessidade de realizar mais pesquisas neste nicho de pesquisa.

Quadro 1. Matriz SWOT para a aplicação de modelos matemáticos de estimativas teóricas de biogás em aterros sanitários no Brasil.

PONTOS POSITIVOS	PONTOS NEGATIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Estimativas teóricas de CH₄ geradas pelos modelos matemáticos são confiáveis e permitem avaliar a viabilidade econômica de projetos de aproveitamento energético; • O fomento da geração distribuída de eletricidade no Brasil, leva ao aumento da segurança energética do país com a simultânea redução do custo da energia elétrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de dados atualizados sobre a composição física dos RSU gerados no Brasil e sobre a infraestrutura dos aterros sanitários inviabiliza estimativas teóricas mais acuradas; • Estimativas de CH₄ podem ser superestimadas ou subestimadas devido ao ajuste inadequado dos parâmetros do modelo.
OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação do modelo IPCC–FOD (2006) para estimativas das emissões de GEE em aterros sanitários no Brasil; • Aproveitamento energético via geração de energia térmica ou substituição da demanda local por gás natural. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta planejamento estratégico e modernização à gestão dos aterros sanitários no Brasil; • Destinação inadequada dos RSU em aterros controlados e lixões ainda é uma realidade no Brasil, e muitos esforços em gestão de RSU estão concentrados nessa área.

4. Conclusões

Os resultados obtidos da análise quantitativa demonstraram uma tendência de crescimento no número de publicações no período de 2013 a 2020 e ainda, que Índia, China e Estados Unidos são os países que mais publicaram dentro da temática de estudo no período considerado. Sendo estes países geradores de elevados volumes de RSU, os mesmos necessitam implementar e desenvolver métodos de acompanhamento e controle das emissões de GEE em aterros sanitários, bem como, investirem em pesquisa e desenvolvimento de estratégias sustentáveis para o CH₄ nestes ambientes. Do ponto de vista qualitativo, o LandGEM 3.02 é o modelo mais utilizado, muito provavelmente, em razão da praticidade e aplicabilidade a diversas regiões, com o ajuste dos parâmetros k e L_0 .

O aproveitamento do biogás de aterro para geração de energia elétrica foi estudado em todos os trabalhos avaliados na etapa da análise qualitativa. Por fim, sobre a aplicação de modelos matemáticos de estimativas teóricas de CH₄ em aterros sanitários no Brasil, a análise da matriz SWOT apresentou como destaques: a facilidade de aplicação e a confiabilidade dos resultados das estimativas teóricas geradas pelo modelo LandGEM e o fomento da geração distribuída de eletricidade no Brasil por meio do uso energético do biogás de aterro, o que pode contribuir para redução da dependência da energia hidrelétrica no país.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências bibliográficas

Abdelli, IS, Addou, FY, Dahmane, S, Abdelmalek, F e Addou, A (2020) ‘Assessment of methane emission and evaluation of energy potential from the municipal solid waste landfills’, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, [online], v. 42, pp. 1–20. <<https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1813221>>.

Abrelpe (2020) *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil*. Brazilian Association of Public Cleaning and Special Waste - Abrelpe (em Português), São Paulo.

Aguilar-Virgen, Q, Taboada-González, P, Ojeda-Benítez, S e Cruz-Sotelo, S (2014) ‘Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online], v. 30, pp. 412–419. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.014>>.

Alfaia, RG de SM, Costa, AM e Campos, JC (2017) ‘Municipal solid waste in Brazil: A review’, *Waste Management and Research*, [online], v. 35, n. 12, pp. 1195–1209. <<https://doi.org/10.1177/0734242X17735375>>.

Amini, HR, Reinhart, DR e Mackie, KR (2012) ‘Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties’, *Waste Management*, [online], v. 32, n. 2, pp. 305–316. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.021>>.

Andriani, D e Atmaja, TD (2019) ‘The potentials of landfill gas production: a review on municipal solid waste management in Indonesia’, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, [online], v. 21, n. 6, pp. 1572-1586. <<https://doi.org/10.1007/s10163-019-00895-5>>.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (2012) *Resolução Normativa Nº 482, De 17 De Abril De 2012* [pdf]. <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> (Acesso em 23 maio 2021).

Bezerra, FEC, e de Alexandria, A (2020) ‘Biomethane Generation Produced in Municipal Landfill’, *International Journal for Innovation Education and Research*, [online], v. 8, n. 12, pp. 01–21. <<https://doi.org/10.31686/ijer.vol8.iss12.2644>>.

BRASIL (2010) ‘Lei nº 12.305 de agosto de 2010’. <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm> (Acessado 18 maio 2021).

Celeste, WC, Rocha, HR de O, Coura, DJC, Oliveira, FDC (2016) ‘Produção e Transporte de Energia Elétrica’ in Chaves, G e Tosta, M (eds.), *Gestão de Sistema de Energia*. Curitiba, BR: CRV, pp. 69-92

Choudhary, A, Kumar, A e Kumar, S (2020) ‘National Municipal Solid Waste Energy and Global Warming Potential Inventory: India’, *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, [online], v. 24, n. 4, 06020002. <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HZ.2153-5515.0000521>>.

Da Silva, LJVB, Dos Santos, IFS, Mensah, JHR, Gonçalves, ATT e Barros, RM (2020a) ‘Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential’, *Renewable Energy*, [online], v. 149, pp. 1386–1394. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.134>>.

Da Silva, NF, Schoeler, GP, Lourenço, VA, De Souza, PL, Caballero, CB, Salamoni, RH e Romani, RF (2020b) ‘First order models to estimate methane generation in landfill: A case study in south Brazil’, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [online], v. 8, n. 4, pp. 104053. <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104053>>.

Dalmo, FC, Simão, NM, Lima, HQ de, Medina Jimenez, AC, Nebra, S, Martins, G, Palacios-Bereche, R e Henrique de Mello Sant’Ana, P (2019) ‘Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil’, *Journal of Cleaner Production*, [online], v. 212, pp. 461–474. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.016>>.

Das, S, Lee, SH, Kumar, P, Kim, KH, Lee, SS e Bhattacharya, SS (2019) ‘Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability’, *Journal of Cleaner Production*, [online], v. 228, pp. 658–678. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.323>>.

De Andrade, JVB, Rodrigues, B N, dos Santos, IFS, Haddad, J, e Filho, GLT (2020) ‘Constitutional aspects of distributed generation policies for promoting Brazilian economic development’, *Energy Policy*, [online], v. 143, pp. 111555. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111555>>

De Brito, RC, Barros, RM, dos Santos, IFS, Tiago Filho, GL e da Silva, SPG (2021) ‘Municipal solid waste management and economic feasibility for electricity generation from landfill gas and anaerobic reactors in a Brazilian state’, *Environmental Technology & Innovation*, [online], v. 22, pp. 101453. <<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101453>>.

Dos Santos, RE, Dos Santos, IFS, Barros, RM, Bernal, AP, Tiago Filho, GL e Da Silva, FGB (2019) ‘Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis’, *Journal of Environmental Management*, [online], v. 231, pp. 198–206. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>>.

- EPE- Empresa de Pesquisa Energética (2018) *Nota Técnica DEA 019/2018- Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano* [pdf]. <www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-309/NT%20Biometano%20de%20Aterro%20vf%200192018.pdf> (Acesso em 24 maio 2021).
- Fallahizadeh, S, Rahmatinia, M, Mohammadi, Z, Vaezzadeh, M, Tajamiri, A e Soleimani, H (2019) ‘Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran’, *MethodsX*, [online], v. 6, pp. 391–398. <<https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.013>>.
- Fan, W e Hao, Y (2020) ‘An empirical research on the relationship amongst renewable energy consumption, economic growth and foreign direct investment in China’, *Renewable Energy*, [online], v. 146, pp. 598–609. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.170>>.
- Freitas, FF, De Souza, SS, Ferreira, LRA, Otto, RB, Alessio, FJ, De Souza, SNM, Venturini, OJ e Junior, OA (2019) ‘The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online], v. 101, pp. 146–157. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>>.
- Gollapalli, M e Kota, SH (2018) ‘Methane emissions from a landfill in north-east India: Performance of various landfill gas emission models’, *Environmental Pollution*, [online], v. 234, pp. 174–180. <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.064>>.
- Guozhu, M, Huang, N, Chen, L e Wang, H (2018) ‘Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis’, *Science of the Total Environment*, [online], v. 635, pp. 1081–1090. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.173>>.
- Hoo, PY, Hashim, H e Ho, WS, (2018) ‘Opportunities and challenges: Landfill gas to biomethane injection into natural gas distribution grid through pipeline’, *Journal of Cleaner Production*, [online] 175, pp.409–419. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.193>>.
- IEA (2020) *Outlook for biogas and biomethane* [online], IEA. <<https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2020) *Cidades* [online]. <<https://cidades.ibge.gov.br/>> (Acesso em 24 maio 2021).
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, IGES, Japão.
- Kovalev, D, Kovalev, A, Grigoryev, V, Litty, Y e Egorov, M, (2021) ‘Biogas and Landfill Gas Converting To Gas Motor Fuel Through Clathrate Hydrate’, *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, [online], v. 8, n. 1, pp. 293–300. <http://procedia-esem.eu/pdf/issues/2021/no1/32_02.32.Litty_21.pdf>.
- Kumar, R (2020) ‘India & South Asia: Geopolitics, regional trade and economic growth spillovers’, *The Journal of International Trade & Economic Development*, [online], v. 29, n. 1, pp. 69–88. <<https://doi.org/10.1080/09638199.2019.1636121>>.
- Kumar, S, Smith, S., Fowler, G, Velis, C, Kumar, SJ, Arya, S, Rena, Kumar, R e Cheeseman, C (2017) ‘Challenges and opportunities associated with waste management in India’, *Royal Society Open Science*, [online], v. 4, n. 3. <<https://doi.org/10.1098/rsos.160764>>.
- Lee, S, Kim, J e Chong, WKO (2016) ‘The causes of the municipal solid waste and the greenhouse gas emissions from the waste sector in the United States’, *Waste Management*, [online], v. 56, pp. 593–599. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.022>>.
- Lima, PDM, Colvero, DA, Gomes, AP, Wenzel, H, Schalch, V e Cimpan, C, (2018a) Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil, *Waste Management*, [online], v. 78, pp. 857–870. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.007>>.
- Lima, RM, Santos, AHM, Pereira, CRS, Flauzino, BK, Pereira, ACOS, Nogueira, FJH e Valverde, JAR (2018b) Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil, *Waste Management*, [online], v. 74, pp. 323–334. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.011>>.

- Lino, FAM e Ismail, KAR (2018) ‘Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil’, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, [online], v. 29, pp. 19–25. <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.011>>.
- Lino, FAM e Ismail, KAR (2012) ‘Analysis of the potential of municipal solid waste in Brazil’, *Environmental Development*, [online], v. 4, n. 1, pp. 105–113. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2012.08.005>>.
- Liu, Y, Xing, P e Liu, J, (2017) ‘Environmental performance evaluation of different municipal solid waste management scenarios in China’, *Resources, Conservation and Recycling*, [online], v. 125, pp. 98–106. <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.005>>.
- Lombardi, F, Costa, G e Sirini, P (2017) ‘Analysis of the role of the sanitary landfill in waste management strategies based upon a review of lab leaching tests and new tools to evaluate leachate production’, *Revista Ambiente e Agua*, v. 12, n. 4, pp. 543–555. <<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2096>>.
- Manasaki, V, Palogos, I, Chourdakis, I, Tsafantakis, K e Gikas, P (2021) ‘Techno-economic assessment of landfill gas (LFG) to electric energy: Selection of the optimal technology through field-study and model simulation’, *Chemosphere*, [online], v. 269, pp. 128688. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128688>>.
- Margon, R, Pinotti, L e Freitas, RR de (2018) ‘Enzymatic hydrolysis of eucalyptus biomass for bioethanol production: a bibliometric analysis’, *Research, Society and Development*, [online], v. 7, n. 4, e1474301. <<https://doi.org/10.17648/rsd-v7i4.301>>.
- Markgraf, C e Kaza, S (2016) *Financing Landfill Gas Projects in Developing Countries. Urban Development Series Knowledge Papers*. World Bank.
- MME - Ministério de Minas e Energia (2015) *Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD)* [pdf]. <<http://antigo.mme.gov.br/documents/20182/6dac9bf7-78c7-ff43-1f03-8a7322476a08>> (Acesso em 23 maio 2021).
- Moreto, ER, Porto, PS da S e Freitas, RR de (2020) ‘Análise bibliométrica de alternativas para remoção de nutrientes de águas residuais nas bases Scopus, Web of Science e Scielo’, *Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, [online], v. 6, n. 7, pp. 133–149. <<https://doi.org/10.47456/bjpe.v6i7.32903>>.
- Nandan, A, Yadav, BP, Baksi, S e Bose, D (2017) ‘Recent Scenario of Solid Waste Management in India’, *World Scientific News*, [online], v. 66, pp. 56–74. <www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.psjd-bbb8c945-dfcb-4449-bb28-09cca98de565>.
- Narwane, VS, Yadav, VS, Raut, RD, Narkhede, BE e Gardas, BB (2021) ‘Sustainable development challenges of the biofuel industry in India based on integrated MCDM approach’, *Renewable Energy*, [online], v. 164, pp. 298–309. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.077>>.
- Neto, FADC (2017) ‘Rotas Prováveis de Utilização: Geração de Energia Elétrica ou Distribuição Canalizada’, apresentado no 9º Congresso Brasileiro De Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Maceió, AL, pp. 9-11, novembro. <http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54704/1/2017_eve_facastroneto.pdf>.
- Paes, MX, Mancini, SD, De Medeiros, GA, Bortoleto, AP e Kulay, LA (2018) ‘Life cycle assessment as a diagnostic and planning tool for waste management-a case study in a Brazilian municipality’ *Journal of Solid Waste Technology and Management*, [online], v. 44, n. 3, pp. 259–269. <<https://doi.org/10.5276/JSWTM.2018.259>>.
- Penteado, R, Cavalli, M, Magnano, E e Chiampo, F (2012) ‘Application of the IPCC model to a Brazilian landfill: First results’, *Energy Policy*, [online], v. 42, pp. 551–556. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.023>>.
- Pereira, TDS e Fernandino, G (2019) ‘Evaluation of solid waste management sustainability of a coastal municipality from northeastern Brazil’, *Ocean and Coastal Management*, [online], v. 179, pp. 104839. <<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104839>>.
- Piñas, JAV, Venturini, OJ, Lora, EES, de Oliveira, MA e Roalcaba, ODC (2016) ‘Landfills for electricity generation from biogas production in Brazil: Comparison of LandGEM (EPA) and Biogas (Cetesb)

- models', *Revista Brasileira de Estudos de População*, [online], v. 33, n. 1, pp. 175-188. <<https://doi.org/10.20947/S0102-309820160009>>.
- Pisani, R, Alves de Castro, MCA e da Costa, AA (2018) 'Influence of population, income and electricity consumption on per capita municipal solid waste generation in São Paulo State, Brazil', *Journal of Material Cycles and Waste Management*, [online], v. 20, n. 2, pp. 1216–1227. <<https://doi.org/10.1007/s10163-017-0687-0>>.
- Qu, S, Guan, D, Ma, Z e Yi, X (2019) 'A study on the optimal path of methane emissions reductions in a municipal solid waste landfill treatment based on the IPCC-SD model', *Journal of Cleaner Production*, [online], v. 222, pp. 252–266. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.059>>.
- Saghir, M, Naimi, Y e Tahiri, M (2018) 'First-order mathematical modeling of biogas production: Application for the controlled landfill of fez', In: *3rd Renewable Energies, Power Systems and Green Inclusive Economy, REPS and GIE*, pp.1–6. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/REPSGIE.2018.8488783>>
- Sánchez, AD, Rama, M de la CDR e García, JÁ (2017) 'Bibliometric analysis of publications on wine tourism in the databases Scopus and WoS', *European Research on Management and Business Economics*, [online], v. 23, n. 1, pp. 8–15. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.iedeen.2016.02.001>>.
- Santos, MM, Romanel, C e Elk, AGHPV (2017) '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, pp. 1151–1162. <<https://doi.org/10.1590/s1413-41522017156311>>.
- Secchim, AB, Freitas, RR de e Gonçalves, W, 2018. 'Mapeamento e análise bibliométrica da utilização da Análise Envoltória de Dados (Dea) em estudos de engenharia de produção', *Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, [online], v. 4, n. 1, pp. 116–128. <https://doi.org/10.0001/v4n1_8>.
- SEEG (2020) 'Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas de Clima do Brasil 1970-2019'. Disponível em: <https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos Analiticos/SEEG_8/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf>. (Acesso em 20 maio 2021).
- Sharma, BK e Chandel, MK (2021) 'Life cycle cost analysis of municipal solid waste management scenarios for Mumbai, India', *Waste Management*, [online], v. 124, pp. 293–302. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.002>>.
- Souza, ARD, Silva, ATYL, Trindade, AB, Freitas, FF e Anselmo, JA (2019) '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*, [online], v. 24, n. 5, pp. 887-896. <<https://doi.org/10.1590/s1413-41522019187066>>
- Suela, SC, Porto, PS da S e Freitas, RR de (2018) 'Tratamento de águas residuais para produção de estruvita: um estudo bibliométrico', *Research, Society and Development*, [online], v. 7, n. 9, e1179380-e1179380. <<https://doi.org/10.17648/rsd-v7i9.380>>.
- The World Bank (2020) *World Development Indicators: Population dynamics*. Disponível em: <<http://wdi.worldbank.org/table/2.1>> (Acesso em 21 maio 2021).
- United States Environmental Protection Agency – USEPA (2005) *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) version 3.02 User's Guide, EPA-600/R-05/47*. USEPA, United States.
- Xiao, S, Dong, H, Geng, Y, Fujii, M e Pan, H (2021) 'Greenhouse gas emission mitigation potential from municipal solid waste treatment: A combined SD-LMDI model', *Waste Management*, [online], v. 120, pp. 725–733. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.040>>.
- Yodi, Y, Suryawan, IWK e Afifah, AS (2020) 'Estimation of Green House Gas (GHG) emission at Telaga Punggur landfill using triangular, LandGEM, and IPCC methods', *Journal of Physics: Conference Series*, [online], v. 1456, p. 1. <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1456/1/012001>>.
- Zavarise, JP e Pinotti, LM (2020) 'Advances in biochemical characterization of microbial lipases: a review', *Research, Society and Development*, [online], v. 9, n. 4, pp. 1-22. <<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.2897>>
- Zhao, R, Xi, B, Liu, Y, Su, J e Liu, S, (2017) 'Economic potential of leachate evaporation by using landfill gas: A system dynamics approach', *Resources, Conservation and Recycling*, [online], v. 124, pp. 74–84. <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.010>>