
Biogás: Uma forma de energia limpa e renovável em meio a uma crise mundial ambiental

Biogas: A form of clean and renewable energy amid a global environmental crisis

João Victor Rego Ferreira Sbrano¹, Andressa Sbrano da Silva Ferreira¹, Denise Maria Mano Pessoa¹, Tácio Mauro Pereira de Campos¹, Alexander Machado Cardoso^{2*}

RESUMO

Existe uma preocupação mundial relacionada às necessidades energéticas atuais e futuras. O investimento em energia limpa está aumentando gradualmente, mas ainda está muito aquém do que é necessário para atender à crescente demanda por serviços de energia de maneira sustentável. Dentre os principais gases de efeito estufa destaca-se o gás metano (CH₄). As fontes antropogênicas de CH₄ correspondem a 60% das emissões globais, destacando-se a decomposição de resíduos em aterros sanitários (até 20% do total das emissões). Uma forma utilizada para obtenção do biogás é o aproveitamento energético do lixo. Diversos países iniciaram a instalação de usinas de biogás em aterros sanitários para não só promover economia energética, como também favorecer a diminuição da emissão do metano na atmosfera. A redução das emissões desses gases é uma preocupação constante do governo. O Ministério do Desenvolvimento Regional vem também incentivando o uso de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) de modo a possibilitar a comercialização de “créditos de carbono” aos países ou cidades que não conseguem reduzir seus níveis aos padrões exigidos pelo Protocolo de Quioto.

Palavras-chave: Biogás; Energia sustentável; Metano; RSU.

ABSTRACT

There is a global concern related to current and future energy needs. Investment in clean energy is gradually increasing but still falls far short of what is required to meet the growing demand for sustainable energy services. Among the main greenhouse gases, methane gas (CH₄) is one of the major greenhouse gases. Anthropogenic sources of CH₄ account for 60% of global emissions, particularly the decomposition of waste in landfills (up to 20% of total emissions). One form used to obtain biogas is waste energy. Several countries have begun installing biogas plants in landfills to promote energy savings and reduce atmospheric methane emissions. The reduction in the emissions of these gases is a constant concern for the government. The Ministry of Regional Development has also been encouraging the use of Clean Development Mechanisms (CDM) to enable the commercialization of "carbon credits" to countries or cities that fail to reduce their levels to the standards required by the Kyoto Protocol.

Keywords: Biogas; Sustainable Energy; Methane; USW.

¹ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro

*E-mail: amcardosopf@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

O ano de 2021 colocou demandas excepcionais nos mercados de eletricidade em todo o mundo. O forte crescimento econômico, combinado com invernos mais frios e verões mais quentes, impulsionou a demanda global de eletricidade em mais de 6% – o maior aumento desde 2010. A rápida recuperação na demanda geral de energia prejudicou as cadeias de fornecimento de carvão e gás natural, elevando os preços da eletricidade (IEA, 2021).

Apesar do crescimento da energia renovável, a geração de eletricidade a partir de carvão e gás atingiu níveis recordes. Como resultado, as emissões anuais de dióxido de carbono do setor elétrico global saltaram para um novo recorde histórico após terem diminuído nos dois anos anteriores. O carvão é a maior fonte de emissão global de carbono, e o nível historicamente alto de geração de energia a carvão em 2021 é um sinal preocupante de quão longe o mundo está em seus esforços para reduzir as mudanças climáticas (IEA, 2022).

Governantes de todo o mundo não tem investido o suficiente para atender às suas necessidades futuras de energia. O investimento em energia limpa está aumentando gradualmente, mas ainda está muito aquém do que é necessário para atender à crescente demanda por serviços de energia de maneira sustentável (IEA, 2022). O ideal seria triplicar esse investimento até 2030 para colocar o mundo no caminho certo para limitar o aquecimento global a 1,5°C. Em nível global, aumentar o fornecimento de energia de baixo carbono de origem doméstica oferece uma oportunidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e, ao mesmo tempo, abordar questões de segurança energética (WELSBY *et al.*, 2021).

FONTES ALTERNATIVAS AOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

A matriz energética mundial é voltada para a utilização de fontes de carbono fóssil, com participação de 80% do total de energia utilizada, sendo 36% de petróleo, 23% de carvão mineral e 21% de gás natural (SCARLAT *et al.*, 2015). A utilização de combustíveis fósseis é um dos principais fatores que influenciam negativamente a qualidade e o equilíbrio do meio ambiente. A utilização do petróleo traz grandes riscos para o meio ambiente desde o processo de extração, transporte (com vazamentos em grande escala de oleodutos e navios petroleiros), refino, até o consumo, com a produção

de gases que poluem a atmosfera que corresponde a 80% do volume de emissões de gases de efeito estufa (DRUMM, *et al.*, 2014).

Com relação à energia eólica, o Brasil está na lista de maiores produtores de energia eólica do mundo. O estudo “Energia Eólica no Brasil e Mundo”, do Ministério de Minas e Energia, aponta que o país foi o quarto colocado no *ranking* mundial de expansão de potência eólica em 2014 (PORTAL BRASIL, 2016). Apenas três países tiveram uma produção maior de energia eólica: a China (23.149 megawatts), Alemanha (6.184 megawatts) e Estados Unidos (4.854 megawatts) (PORTAL BRASIL 2016). No mesmo período, o Brasil teve uma expansão de potência instalada de 2.686 megawatts (MW) (PORTAL BRASIL, 2016). Este tipo de energia tem a vantagem de ser inesgotável, não emite gases poluentes nem gera resíduo e diminui a emissão de gases de efeito de estufa, contudo, a produção de energia eólica é uma técnica com alto custo de instalação e manutenção, baixo rendimento e ideal para áreas afastadas desprovidas de infraestrutura de rede elétrica. Por isso, devido à crise instaurada no Brasil, pela primeira vez, em 2016, o governo não promoveu nenhum leilão para contratar projetos de energia eólica e não há previsão de leilões em 2017 (PORTAL-ENERGIA, 2015).

Outra alternativa aos combustíveis fósseis é a energia solar. Os cinco principais países que utilizam essa tecnologia são: Alemanha, China, Japão, Itália e Estados Unidos. Juntos esses países respondem a 70% do total mundial nessa fonte. Ao longo dos anos essa tecnologia vem sendo mais desenvolvida no Brasil. No ano de 2014, o Brasil registrou a produção de 180 Giga watts (GW), 40,2 GW a mais que em 2013 (PORTAL BRASIL, 2016). O governo brasileiro espera estar entre os 20 países com maior geração solar em 2020. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2024) estima que a capacidade instalada de geração solar chegue a 8.300 Megawatts (MW) em 2024, sendo 7.000 MW de geração descentralizada e 1.300 MW distribuída. A proporção de geração solar deve chegar a 1% do total da energia produzida no país (PORTAL BRASIL, 2016).

Hoje, o investimento neste tipo de energia ainda é caro; porém uma das maiores vantagens seria a menor necessidade de utilização das usinas termoeletricas, que são caras, mas seu uso evitaria a emissão de gases poluentes para a atmosfera e teria independência da conta de energia elétrica. Como sinalizado anteriormente, o alto custo desta tecnologia atrelada aos impostos e as baterias para armazenar energia dificultam a maior utilização desta tecnologia (SOLAR, 2017).

Existe também é a energia sustentável oriunda da cana-de-açúcar. Com o objetivo de produzir energia através do cultivo da cana-de-açúcar o Brasil se tornou o maior produtor mundial de cana com mais de sete milhões de hectares plantados e com uma produção de mais de 480 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (EMBRAPA, 2010). A cana-de-açúcar é uma biomassa que pode ser transformada quase que totalmente em energia aproveitável mediante processos industriais, que em sua maioria, apresentam alto índice de aproveitamento dos subprodutos e relativo baixo impacto ambiental. A cana-de-açúcar é capaz de gerar açúcar, álcool anidro (aditivo para a gasolina) e álcool hidratado, além de possibilitar a geração de energia elétrica por meio da queima do bagaço. Além disso, empresas brasileiras tais como Montese, EPG e a GEO Energética já conseguem obter biogás a partir da reciclagem dos resíduos (vinhaça, torta de filtro e palha) da cana-de-açúcar (GEO ENERGÉTICA, 2013).

Comparando a cana-de-açúcar ao petróleo, uma tonelada de cana-de-açúcar representa 1.718.000 kcal, se comparado com o potencial energético de um barril de petróleo que é de 1.386.000 kcal, ou seja, uma tonelada de cana equivale energeticamente a 1,24 barris de petróleo bruto. A grande busca e utilização dessa fonte de energia gera um desequilíbrio no setor agrícola. Por ser mais rentável, nas últimas décadas, houve um aumento considerável na porcentagem de produção de cana-de-açúcar e a diminuição na produção de outros alimentos (SOARES e ROSSELL, 2015). Com isso gera-se um resíduo agroindustrial de maior quantidade no Brasil, com estimativas de até 280 kg/tonelada de cana-de-açúcar moída (SOARES e ROSSELL, 2015). Neste sentido, pesquisas recentes têm sido realizadas visando à obtenção de um melhor aproveitamento energético a partir do bagaço de cana. Uma possível alternativa para o aproveitamento energético do bagaço constitui-se na geração de biogás através do processo de biodigestão anaeróbia (GEO ENERGÉTICA, 2013). Outra forma muito utilizada para obtenção do biogás é o aproveitamento energético do lixo. Diversos países iniciaram a instalação de usinas de biogás em aterros sanitários para não só promover economia energética, como também favorecer a diminuição da emissão do metano na atmosfera. Abaixo segue a comparação energética entre o biogás e outros combustíveis segundo EDWIGES (2011).

As tabelas e ilustrações (mapas, diagramas, organogramas, quadros, fotografias, gráficos, fluxogramas, entre outros) devem ser apresentadas no corpo do documento, centralizados, com identificação na parte de cima e fonte na parte de baixo, ambos tamanho 11pts, sempre com a melhor qualidade gráfica possível. Veja o exemplo abaixo.

Tabela 1- Comparativo energético de 1m³ de biogás com outros combustíveis

Combustíveis	1 m ³ de Biogás equivale à
Gasolina	0,613 litros
Querosene	0,579 litros
Óleo diesel	0,553 litros
Gás de cozinha (GLP)	0,454 litros
Lenha	1,536 Kg
Álcool Hidratado	0,790 litros
Eletricidade	1,428 kW

Fonte: EDWIGES (2011)

Os gases de efeito estufa são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), os halocarbonetos (HFC/ CFC's) e o ozônio (O₃) (ZUBERI e ALI, 2015). Dentre esses destaca-se o gás CH₄, que é o segundo principal, 28 vezes mais potente do que o CO₂ (principal gás) (ABRELPE, 2020).

Das principais fontes antropogênicas de emissão de CO₂ destacam-se o desmatamento e a queima de combustíveis fósseis para aproveitamento energético (CENAMO, 2004). Já no caso do CH₄, as fontes antropogênicas correspondem a aproximadamente 60% das emissões globais, incluindo como fontes a produção de combustíveis fósseis, fermentação entérica do gado, o manejo de dejetos animais, as plantações de arroz, a queima de biomassa e a decomposição de resíduos em aterros sanitários, que correspondem a até 20% do total das emissões (TEIXEIRA *et al.*, 2009). Em 2019, o setor de resíduos respondeu por 4% do total de emissões de gases de efeito estufa no Brasil, o que corresponde a 96 milhões de toneladas de CO₂ emitidas. Ao considerar o ano de 2010 como um referencial, foi registrado um aumento de 23% nas emissões, com dois terços destas sendo provenientes de atividades de disposição final, incluindo aterros sanitários, aterros controlados e lixões (ABRELPE, 2020).

É possível projetar a geração de RSU no país para os próximos anos, que resulta em uma curva crescente ao longo de 30 anos. Até 2050, o Brasil observará um aumento de quase 50% no montante de RSU, em comparação ao ano base de 2019. Para esse mesmo período, a projeção de crescimento populacional esperado é de 12%, com uma oferta maior de geração de biogás nos aterros sanitários (ABRELPE, 2020).

Quando os resíduos são depositados em aterros, a matéria orgânica nos detritos se decompõe em gás de aterro, uma mistura de 45 a 60% de CH₄, CO₂ (40 a 55%) e outros como amônia (NH₃), Hidrogênio (H₂), gás sulfídrico (H₂S), Nitrogênio (N₂) e Oxigênio (O₂), em quantidades traço. A taxa de produção desse gás aumenta de forma constante enquanto os RSU se acumulam no aterro sanitário. A escala de tempo da geração de gás depende da composição do resíduo e do clima (MATTHEW e THEMELIS, 2007).

A produção de CH₄ e de CO₂ acontece em média por 25 anos no aterro, mas as emissões desses gases podem durar até 50 anos. A decomposição anaeróbia de uma tonelada de RSU úmido, possivelmente contendo 60% de matéria orgânica e 40% de umidade, pode gerar teoricamente 200 Nm³ de metano (150 kg de metano) (SCARLAT *et al.*, 2015).

O conteúdo energético dos resíduos pode ser recuperado através de processos termoquímicos (combustão, pirólise ou gaseificação) ou processos biológicos (digestão anaeróbia). A digestão anaeróbia é um processo em que a matéria orgânica complexa é degradada a compostos mais simples. A degradação ocorre através da ação de diversos grupos de microrganismos que interagem simultaneamente até a formação dos produtos finais, gás metano e gás carbônico (MALANCONI e CABRAL, 2012).

No Brasil, os sistemas de captura e aproveitamento do biogás em aterros sanitários ainda não são uma realidade em todas as unidades. De acordo com a plataforma da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Clima, existem 49 projetos de recuperação de biogás registrados no país. É urgente o encerramento das áreas de disposição inadequada e isto deve ser priorizado sob todos os aspectos. A transição para os aterros sanitários deve ser acompanhada de medidas de mitigação de emissões, combinadas com projetos de valorização prévia dos resíduos sólidos conforme determina a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (ABRELPE, 2020).

Pesquisas sobre o papel de microrganismos nos processos que resultam na produção e degradação de CH₄ são de extrema importância e essenciais para o melhor

aproveitamento energético desse gás (LINHARES, 2012). A produção de metano por microrganismos é conhecida como metanogênese e os microrganismos são chamados de metanogênicos. Eles pertencem ao domínio *Archaea* e vivem em pântanos, sedimentos e depósitos de resíduos sólidos urbanos (ZUBERI & ALI, 2015). Nesses ambientes anaeróbicos o oxigênio está ausente ou sua concentração é muito reduzida (BARLAZ *et al.*, 1990).

ARCHAEAS METANOGENICAS

Durante a metanogênese (produção de metano) na biodigestão anaeróbia, o ácido acético, o gás hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em metano e gás carbônico. Essa transformação ocorre pela ação das *Archaeas* metanogênicas, de acordo com a reação simplificada:



Onde a equação 1 representa a quebra da molécula de glicose, sendo transformada em dióxido de carbono e metano.

Esta transformação exige pelo menos as ações sucessivas de quatro populações de microrganismos que degradam moléculas complexas em compostos mais simples, nos seguintes processos:

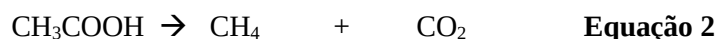
(1) **hidrólise** de polímeros biológicos em monômeros (carboidratos, proteínas e gorduras, são quebradas por enzimas e dão origem a compostos orgânicos simples como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares). Essa quebra é realizada por uma microflora hidrolítica que pode ser tanto aeróbia ou facultativa, ou anaeróbia estrita;

(2) **acidogênese** das substâncias resultantes da hidrólise são transformadas por uma microflora fermentativa que pode ser facultativa ou estritamente anaeróbica, em ácido propanoico, ácido butanoico, ácido láctico e alcoois assim como gás hidrogênio e gás carbônico. A concentração de hidrogênio dissolvido é importante nessa fase. Quando a concentração é muito alta, interfere negativamente na eficiência da acidogênese o que causa o acúmulo de ácidos orgânicos. Com isso, o pH da mistura baixa e o processo pode ser quase que totalmente afetado.

(3) **acetogênese** dos metabólitos anteriores que são transformados em ácido etanóico, gás hidrogênio e gás carbônico por um microrganismo ou microflora

homoacetogênica. Essa é uma das fases mais delicadas do processo, pois é necessário manter o equilíbrio para que a quantidade de hidrogênio gerado seja consumida pelas *Archeas* responsáveis pela metanogênese.

(4) **metanogênese** dos compostos simples que podem ser usados por metanogênicas, o que constitui a última etapa da fermentação metanogênica, descrita através de duas reações como mostrado na equação 2 e 3: (MER; ROGER, 2001).



Onde a equação 2 representa a conversão do ácido etanoico em metano e dióxido de carbono.



A equação 3 indica a utilização de moléculas de dióxido de carbono e gás hidrogênio sendo transformadas em metano e água.

Archaeas metanogênicas têm a estrutura em formato de cocos ou bacilos, são anaeróbicas e geralmente não podem suportar o estresse de oxigênio por um tempo prolongado. No entanto, *Methanosarcina barkeri* é excepcional em possuir uma enzima superóxido dismutase (SOD) e pode sobreviver mais tempo do que as outras metanogênicas na presença de O_2 . Algumas metanogênicas, chamadas hidrogenotróficas, usam CO_2 como fonte de carbono e H_2 como agente redutor (THAUER *et al.*, 2008).

Existem mais de 50 espécies de metanogênicas descritas. Dentre as principais espécies temos as: *Methanobacterium bryantii*, *Methanobacterium formicum*, *Methanobrevibacter arboriphilicus*, *Methanobrevibacter gottschalkii*, *Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanobrevibacter smithii*, *Methanococcus chunghsingensis*, *Methanococcus burtonii*, *Methanococcus aeolicus*, *Methanococcus deltae*, *Methanococcus jannaschii*, *Methanococcus maripaludis*, *Methanococcus vanniellii*, *Methanocorpusculum labreanum*, *Methanoculleus bourgensis* (*Methanogenium olentangyi* & *Methanogenium bourgense*), *Methanoculleus marisnigri*, *Methanoflorens stordalenmirensis*, *Methanofollis liminatans*, *Methanogenium cariaci*, *Methanogenium frigidum*, *Methanogenium organophilum*, *Methanogenium wolfei*, *Methanomicrobium mobile*, *Methanopyrus kandleri*, *Methanoregula boonei*, *Methanosaeta concilii*, *Methanosaeta thermophila*,

Methanosarcina acetivorans, *Methanosarcina barkeri*, *Methanosarcina mazei*, *Methanosphaera stadtmanae*, *Methanospirillum hungatei*, *Methanothermobacter defluvii* (*Methanobacterium defluvii*), *Methanothermobacter thermautotrophicus* (*Methanobacterium thermoautotrophicum*), *Methanothermobacter thermoflexus* (*Methanobacterium thermoflexum*), *Methanothermobacter wolfei* (*Methanobacterium wolfei*) e *Methanothrix soehngenii* (THAUER *et al.*, 2008).

FATORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A produção do biogás não está somente restrita às espécies microbianas. Alguns fatores influenciam diretamente a produção do biogás como:

- **Concentração de Oxigênio**

Os microrganismos metanogênicos são anaeróbios. Baixos índices de concentração de oxigênio já podem reduzir significativamente a produção de biogás (GLASS e ORPHAN, 2013).

- **Temperatura**

A temperatura ideal é de extrema importância para se ter uma boa produção de biogás. Microrganismos que coexistem durante a biodigestão trabalham em temperaturas diferentes umas das outras, com temperaturas ideais para ter a melhor eficiência. Os microrganismos são divididos em três grupos de eficiência térmica de acordo com o seu ponto mais alto de temperatura: psicrófilos ($T < 25^{\circ}\text{C}$), mesófilos (de 37 a 42°C) e termófilos (entre 50 e 60°C). No caso dos microrganismos que participam da metanogênese, mesófilos, trabalham em uma temperatura de aproximadamente 39°C . Variações nessa temperatura podem até anular quase que completamente a produção de biogás de um sistema (PAULO *et al.*, 2015).

- **Potencial de Hidrogênio Iônico (pH)**

Cada grupo bacteriano possui seu ponto ideal de acidez para atividade adequada. Nas fases da hidrólise e da acidogênese o pH ideal fica em torno de 5,2 a 6,3. Já na acetogênese e metanogênese o pH ideal fica entre 6,5 a 8 (PAULINO *et al.*, 2022)

- **Volume de água e nutrientes**

A quantidade de água deve variar de 60% a 90% do peso do conteúdo total. Os principais nutrientes são: carbono, sais orgânicos, fósforo e nitrogênio. Deve-se manter uma relação de C/N entre 20:1 e 30:1 (PAULINO *et al.*, 2022)

- **A homogeneidade do substrato**

A eficiência na geração de biogás tem correlação com o processo, preparo e compactação da matéria orgânica para utilização no fermentador. Substratos não homogêneos tendem a formar camadas de acordo com a densidade da mistura no substrato. A maioria dos microrganismos se acumula no fundo do fermentador, devido à diferença de densidade, enquanto que a maior parte do substrato fica na parte de cima. Nesse caso, devido à diminuição do contato entre as bactérias e o substrato, a geração de biogás diminui. Devido a uma co-dependência dos microrganismos da acetogênese e da metanogênese, uma mistura excessiva pode ser prejudicial para a fase anaeróbia deste processo (MACHADO, 2013).

RESPONSABILIDADE AMBIENTAL

De acordo com a Agência Internacional de Energia o número de países que anunciam compromissos para atingir emissões líquidas zero nas próximas décadas continua a crescer, mas as promessas dos governos, até agora, ficam muito aquém do que é necessário para reduzir as emissões globais de CO₂ e CH₄ relacionadas à energia a zero até 2050.

Uma das formas do Brasil diminuir as emissões de CO₂ e CH₄ no setor de resíduos, buscar a diminuição dos custos da energia elétrica e ter um melhor aproveitamento energético é o desenvolvimento de projetos que aproveitem ao máximo o potencial de produção de biogás gerado a partir da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos dispostos nos aterros sanitários. O biogás captado do aterro pode ser queimado em *flare*, onde ocorre a transformação do CH₄ em CO₂, ou então ser convertido em energia elétrica e/ou térmica. Além disso, o biogás pode ser utilizado em sistemas de iluminação a gás.

REFERÊNCIAS

do potencial de geração de biogás de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades. Tese (doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 307 p.

BARLAZ, M.; HAM, R.K.; SCHAEFER, D.M. Methane production from municipal refuse: **A review of enhancement techniques and microbial dynamics.** v. 19, pp. 557-585, 1990.

CLARKE, B.O.; ANUMOL, T.; BARLAZ, M.; SNYDER, S.A. (2015). Investigating landfill leachate as a source of trace organic pollutants. **Chemosphere.** v.127. p. 269–275, 2015.

CENAMO, M.C. **Mudanças Climáticas, O Protocolo de Quioto e Mercado de Carbono.** Mudanças Climáticas e Mercado de Carbono, CEPEA, 2004.

COUTINHO, L.S.F. (2012). **Avaliação do potencial de geração de biogás de amostras de resíduos de diferentes profundidades retiradas do Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho.** Relatório de Iniciação científica (Iniciação científica em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 16p.

DRUMM, F.C.; GERHARDT, A.E.; FERNANDES, G.D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S., KEMERICH, P. D. C.; Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletronica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental.** vol. 18, n.1, p. 66-78, 2014.

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2010. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/Abertura.htmL>. Acesso em: Mar, 2022.

FERREIRA, J.V.R. (2019). **Identificação e metabolismo de microrganismos envolvidos na produção e degradação de metano em dois aterros sanitários do estado Rio de Janeiro.** Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Rio de Janeiro.

GEO ENERGÉTICA. **Tecnologia inovadora para a produção de biogás revolucionaria agroindústria brasileira.** 2013. Disponível em: <http://www.geoenergetica.com.br/imprensa/16/Tecnologia-inovadora-para-a-producao-de-biogas-revolucionaria-a-agroindustria-brasileira>. Acesso em: Jul. 2017.

GLASS J, B.; ORPHAN V. J.; Trace Metal Requirements for Microbial Enzymes Involved in the Production and Consumption of Methane and Nitrous Oxide. **Frontiers in Microbiology.** v.61, 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2022). **Electricity Market Report - January 2022.** Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-january-2022>>. Acesso em 22 de Janeiro de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2022). **Energy transitions require innovation in power system planning**. Disponível em: <<https://www.iea.org/articles/energy-transitions-require-innovation-in-power-system-planning>>. Acesso em 21 de Janeiro de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2022). **Europe and the world need to draw the right lessons from today's natural gas crisis**. Disponível em: <<https://www.iea.org/commentaries/europe-and-the-world-need-to-draw-the-right-lessons-from-today-s-natural-gas-crisis>>. Acesso em 21 de Janeiro de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2021). **Net Zero by 2050**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>>. Acesso em 21 de Janeiro de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2021). **The cost of capital in clean energy transitions**. Disponível em: <<https://www.iea.org/articles/the-cost-of-capital-in-clean-energy-transitions>>. Acesso em 22 de Janeiro de 2022.

LINHARES, D.C. (2012). **Estudo da comunidade metanotrófica em amostras do manguezal de Bertioga, Estado de São Paulo, através da técnica de marcação de ácidos nucleicos com isótopos estáveis (SIP-DNA)**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo. Instituto de Ciências biomédicas. Departamento de Microbiologia. São Paulo, 112p.

MATTHEWS E.; THEMELIS, N.J.; **Potential for reducing global methane emissions from landfills**. 2007. Disponível em: http://www.necec.org/files/Matthews_Themelis_Sardinia_2007.pdf.

MER, J.L.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. **Soil Biol.** v.37. p. 25–50. 2001.

PAULINO, R. S.; DA SILVA, J. C. .; DOS SANTOS, J. C. P. .; BRASIL FILHO, P. H. Potencial energético do biogás gerado em estação de tratamento de esgoto. **Conjecturas**, v. 22, n. 2, p. 15–29, 2022.

PAULO, L. M.; STAMS, A. J. M.; SOUSA, D. Z.; Methanogens, sulphate and heavy metals: a complex system. **Environ Sci Biotechnol.** n.14. p. 537–553, 2015.

PONSÁ, S., GEA, T., SÁNCHEZ, A. Short-time estimation of biogas and methane potentials from municipal solid wastes. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology** v. 86, p.1121-1124. 2011.

PORTAL BRASIL. **Brasil é o quarto país em que energia eólica mais cresce no mundo**. 2016. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-e-um-dos-principais-geradores-de-energia-eolica-do-mundo>.

PORTAL ENERGIA. **Vantagens e desvantagens da energia eólica**. 2015. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-da-energia-eolica>.

ROSADO, P.M.; LEITE, D.C.A.; DUARTE, G.A.S.; CHALOUB, R.M.; JOSPIN, G.; DA ROCHA, U.N.; SARAIVA, J.P.; DINI-ANDREOTE, F. EISEN, J.A.; BOURNE, D.G. & PEIXOTO, R.S. Marine probiotics: increasing coral resistance to bleaching

through microbiome manipulation. **Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology** v.13, 921-936, 2019.

SCARLAT, N.; MOTOLA, V.; DALLEMAND, J.F.; MONFORTI-FERRARIO, F.; MOFOR, L.; Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. vol. 50, p. 1269–1286, 2015.

SOARES, P.A.; ROSSELL, C.E.V. O setor sucroalcooleiro e o domínio tecnológico. Núcleo de análise interdisciplinar de políticas e estratégia da universidade de São Paulo. **Nova série**. vol 2. p. 1-29. 2014.

SOLAR. **Energia solar no Brasil**. 2016 Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>.

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

THAUER, R. K.; KASTER, A.; SEEDORF, H.; BUCKEL, W.; HEDDERICH, R.; *Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation*. **Nature Rev. Microbiol.** v.6, p.579–591, 2008.

WELSBY, D.; PRICE, J.; PYE, S.; EKINS, P.; Author Correction: Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world. **Nature**. p. 230-241. vol. 597, 2021.

ZUBERI, M.J.S.; ALI, S.F. Greenhouse effect reduction by recovering energy from waste landfills in Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 44. p. 117-131, 2015.

Recebido em: 03/07/2022

Aprovado em: 05/08/2022

Publicado em: 10/08/2022