



Aproveitamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos para produção de biogás e biometano no Brasil: uma abordagem teórica sobre a geração de energia através de biodigestores anaeróbicos em plantas de aterros sanitários

Use of the organic fraction of urban solid waste for the production of biogas and biomethane in Brazil: a theoretical approach on energy generation through anaerobic digesters in landfills plants

Gabriel Menon de Lima¹, Waldir Nagel Schirmer¹

¹ Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, Paraná, Brasil

Contato: wanasch@hotmail.com

Palavras-Chave

análise econômica
bioenergia
biocombustíveis
valorização de resíduos sólidos

RESUMO

O aumento da geração de resíduos e a necessidade por energia são idiosincrasias do crescimento populacional, sendo relacionadas às problemáticas globais sobre o efeito estufa e mudanças climáticas causadas pela emissão de gases de efeito estufa (GEE) de fontes antrópicas. O setor de energia é o maior responsável pela emissão de GEE e o setor de gerenciamento de resíduos contribui com parcela significativa da emissão de metano no mundo. A produção de energia renovável via biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários pode solucionar problemas sobre impactos climáticos e, concomitantemente, sobre a disponibilidade de energia. Neste estudo, por meio de pesquisa bibliográfica, os fatores necessários para a análise econômica para produção de biogás e biometano a partir de RSU foram contextualizados através da caracterização dos principais requisitos relacionados ao desenvolvimento de projetos no setor. Dessa maneira, confirma-se que pode haver viabilidade econômica para a produção de energia através de biodigestores anaeróbicos instalados em aterros sanitários, mas fica condicionada a diversos critérios, como escolha da tecnologia de conversão, otimização da configuração dos sistemas e processos, redução de custos de equipamentos, redução custos de manutenção e operação das plantas, além de incentivos governamentais adequados para o desenvolvimento da bioenergia no Brasil.

Keyword

bioenergy
biofuels
economic analysis
solid waste valorization

ABSTRACT

The increase in waste generation and the need for energy are idiosyncrasies of population growth, being related to global issues about the greenhouse effect and climate change caused by the emission of greenhouse gases (GHG) of anthropogenic sources. The energy sector is the main responsible for GHG emissions and the waste management sector contributes a significant portion of methane emissions in the world. The production of renewable energy via anaerobic digestion of municipal urban waste (MSW) in landfills can solve problems on climate impacts and, concomitantly, on energy availability. In this study, through bibliographical research, the necessary factors for economic analysis for the production of biogas and biomethane from MSW were contextualized through the characterization of the main requirements related to the development of projects in the sector. In this way, it is confirmed that there may be economic viability for energy production through anaerobic digesters installed in landfills, but it is subject to several criteria, such as choice of conversion technology, optimization of the configuration of systems and processes, cost reduction of equipment, reduced maintenance and operation costs of plants, in addition to adequate government incentives for the development of bioenergy in Brazil.

Informações do artigo

Recebido: 21 de junho, 2024

Aceito: 20 de julho, 2024

Publicado: 30 de agosto, 2024

Introdução

Agências governamentais, sociedade, empresas do setor privado e pesquisadores têm buscado progressivamente novas fontes de energia sustentáveis como alternativa à utilização de combustíveis fósseis (SCHIRMER et al., 2015; HASSAN et al., 2019). Além disso, o aumento da demanda energética também é estimulado pelo crescimento da economia e da população. Por sua vez, o crescimento populacional é relacionado ao aumento da demanda por alimentos o que, concomitantemente, influencia o aumento de desperdício e geração de resíduos, principalmente em áreas urbanas (LIU et al., 2018; SANTOS et al., 2019; ABRAHAM et al., 2020).

A grande maioria dos países desenvolvidos ou em desenvolvimentos utiliza os aterros sanitários como alternativa para a disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) (MANFREDI et al., 2010; AMINI e HEINHART, 2011; YANG et al., 2014; PARIATAMBY et al., 2015). Aterros sanitários são projetos para disposição final de RSU ambientalmente mais adequada, pois são fundamentados em normas operacionais que minimizam impactos ambientais e evitam danos ou riscos à saúde pública (BRASIL, 2010). Embora aceitos (legalmente) para a gestão de RSU, os aterros estão fortemente relacionados à emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano (CH₄) com potencial de efeito estufa (GWP – *global warming potential*) 21 vezes maior que o dióxido de carbono (CO₂), ambos os GEE mais associados à disposição de RSU nessas plantas (CHENG e HU, 2010; USEPA, 2011). Calcula-se que o setor de gerenciamento de RSU emitiu 9,3% do total global de CH₄ proveniente de atividades humanas entre 1990 e 2015, e pode chegar a 13,4% até 2050 se não houver melhorias relacionadas ao aproveitamento de materiais recicláveis e do conteúdo energético dos RSU produzidos mundialmente (HÖGLUND-ISAKSSON et al., 2020).

O metano e o dióxido de carbono oriundos de atividades antrópicas (logo, correspondente às concentrações acima daquelas naturalmente existentes na atmosfera) são relacionados à poluição atmosférica e impactos ambientais em escala de ordem global, como aquecimento global e mudanças climáticas (UNEP, 2010; SCHEUTZ et al., 2011). A substituição de combustíveis fósseis convencionais por tecnologias de baixa emissão de carbono para geração de energia desempenha um papel importante em resposta à problemática das mudanças climáticas (IRENA, 2020a). Nesse contexto, a utilização de biogás gerado em aterros sanitários constitui-se uma fonte de energia renovável com elevado teor de metano e pode ser uma opção para a produção de energia e minimização das emissões de GEE do setor de gerenciamento de resíduos (BOGNER et al., 2008; UNEP, 2010; YANG et al., 2013; AHMED et al., 2015).

No Brasil, o aproveitamento energético de RSU é incentivado pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010) mas o potencial de reaproveitamento e reciclagem é subutilizado pelas cadeias produtivas.

A proposta de utilização do RSU para produção de energia em etapa anterior à disposição no aterro (aterramento) pode aumentar a produção de biogás por volume de resíduo, além de favorecer garantias relacionadas à previsibilidade sobre a disponibilidade de energia durante os anos de produção, o que pode auxiliar a eficiência de gestão da planta (BRASIL, 2016; PARANÁ, 2018).

A biodigestão anaeróbia é uma tecnologia que consiste na metanização da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) com foco na produção de biogás com potencial energético. Esse processo apresenta diferentes tecnologias e configurações, como processos seco e úmido, estágios simples e múltiplos, entre outros. Essa tecnologia é capaz de reduzir as emissões de metano de maneira difusa pela camada de cobertura do aterro sanitário e aumentar a vida útil da planta através da redução da quantidade de resíduos disposta na área (BRASIL, 2015; BRASIL, 2016).

O biogás é uma mistura gasosa formada predominantemente de metano (de 50 a 75% v./v.), dióxido de carbono (de 25 a 50% v./v.) e centenas de outros gases em menor proporção, dentre estes, o hidrogênio, a amônia, o sulfeto de hidrogênio e outros gases (FNR, 2010; AMINI e REINHART, 2011; KORMI et al., 2018). A remoção do conteúdo não-combustível do biogás (CO₂, N₂, compostos sulfurados, hidrocarbonetos halogenados e vapor d'água) é importante visto que tais gases podem diminuir o poder calorífico da mistura e restringir sua aplicabilidade. Somado a isso, a remoção de compostos sulfurados assegura que os equipamentos usados na captação, transporte e armazenamento do biogás não fiquem sujeitos a processos corrosivos (TIPPAYAWONG e THANOMPONGCHART, 2010; MESCIA et al., 2011; CHUAH et al., 2018). Após a remoção dos contaminantes, o biogás pode ser beneficiado em biometano e comercializado em território brasileiro, caso apresente concentração mínima de 90% de metano (BRASIL, 2017a). O uso do biometano acarreta diversos benefícios ambientais e econômicos, podendo ser empregado em sistemas de aquecimento e resfriamento, para injeção na rede de gás, para produção de eletricidade ou combustíveis, entre outros (SCARLAT et al., 2018; WINQUIST et al., 2019). O uso de biometano combustível é relacionado à existência de incentivos sobre o desenvolvimento tecnológico e à redução de custos para produção (SCARLAT et al., 2018; IRENA, 2020b). Análises de soluções economicamente viáveis e a aplicabilidade em municípios brasileiros são desafiadoras nos âmbitos tecnológico, político e econômico (PADILHA e MESQUITA, 2022). As análises e estimativas econômicas que consideram as mudanças climáticas influenciam decisões políticas e contribuem para tomadas de decisões relacionadas a investimentos e inovações mitigadoras (STERN, 2016).

Dado o exposto, o presente trabalho teve como objetivo principal apresentar a importância ambiental, os custos, as oportunidades, as ferramentas de análise de viabilidade econômica e os incentivos governamentais para implantação de projetos de produção de biogás e biometano a partir da biodigestão anaeróbia de RSU em

plantas de aterros sanitários para o desenvolvimento da matriz energética sustentável no cenário nacional.

Material e Métodos

Este estudo é resultado de uma revisão integrativa de literatura sobre a viabilidade técnico-econômica da implantação de biodigestores anaeróbicos em plantas de aterros sanitários visando a produção de energia no Brasil. De acordo com Torracco (2005), a revisão integrativa de literatura é uma forma de pesquisa que busca analisar, criticar e sintetizar a literatura representativa sobre um tópico para gerar novas estruturas e perspectivas sobre o tópico.

Segundo Elsbach e van Knippenberg (2020), em uma revisão integrativa de literatura, os autores não devem usar um conjunto de argumentos ou perspectivas para orientar a seleção e interpretação de literatura na revisão, visto que uma revisão ampla pode apresentar as ferramentas ideais para avançar na investigação.

Dessa maneira, a temática desse estudo foi justificada pela Lei N° 12.305/2010, que tem como objetivo incentivar o aproveitamento energético de RSU, e pela Lei N° 13.576/2017, que tem como fundamento a importância dos biocombustíveis para a segurança do abastecimento de combustíveis, da preservação ambiental e desenvolvimento econômico e social no Brasil. Partindo de pressupostos alienados às problemáticas ambientais e energéticas, as principais perguntas que basearam essa revisão foram: (i) Quais são os principais impactos ambientais causados pelos setores de gerenciamento de RSU e de energia no Brasil? (ii) De que forma a produção de biometano em aterros sanitários pode reduzir tais impactos ambientais? (iii) Como produzir biometano em plantas de aterros sanitários de maneira economicamente viável? (iv) Quais são os incentivos governamentais para a produção de energia elétrica e biometano em plantas de aterros sanitários?

A busca por possíveis soluções para esses questionamentos partiu de pesquisa realizada em bancos de dados que contêm documentos de órgãos oficiais do governo brasileiro e de agências e instituições (nacionais e internacionais) de interesse energético e ambiental, além de periódicos científicos presentes nos portais: Science Direct; Scientific Electronic Library Online – SciELO; e, Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O estudo considerou publicações entre 1983 e 2024. Esse recorte temporal é justificado pela importância de características do processo de digestão anaeróbia presentes em literatura da década de 80.

Os principais termos indexadores utilizados na seleção de informações sobre impactos ambientais e viabilidade técnico-econômica pertinentes à temática de produção de energia a partir da fração orgânica de RSU através de biodigestores anaeróbios em aterros sanitários, nos idiomas português e inglês, foram: bioenergia e biocombustíveis; impactos ambientais da produção de energia; impactos ambientais do gerenciamento de resíduos sólidos; características físico-químicas do biogás; biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos; produção de biocombustíveis; tecnologias para produção

de biogás e biometano; biogás e biometano de resíduos sólidos urbanos; purificação de biogás; remoção de dióxido de carbono no biogás; análise econômica para produção de bioenergia; análise econômica para produção de biogás e biometano a partir de RSU. De mesmo modo, salienta-se que os termos anteriormente mencionados foram pesquisados de maneira combinada através do conector *AND*.

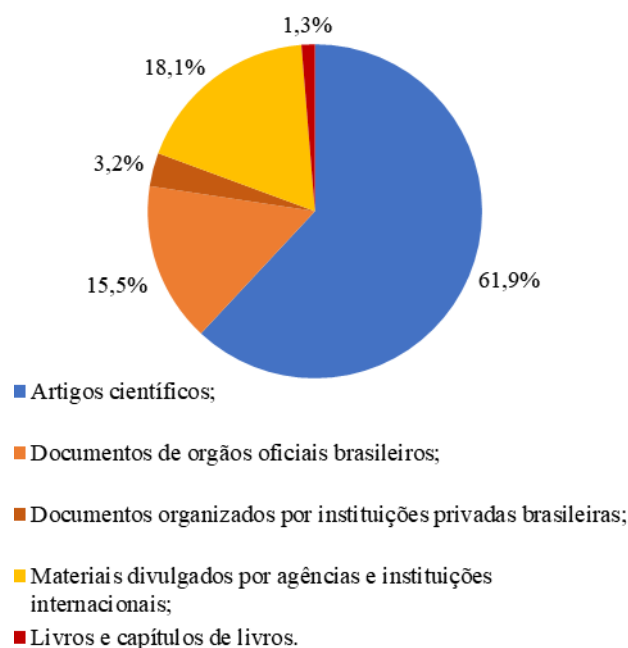
Resultados e Discussão

Além dos aspectos relacionados especificamente ao aproveitamento de RSU para a geração de biogás através de biodigestores em aterros sanitários, as subseções seguintes abordam, inicialmente, um breve panorama da geração atual de RSU no Brasil bem como a importância da gestão de resíduos dessa natureza como medida de controle de gases de efeito estufa e outros impactos de ordem ambiental fortemente associados à disposição inadequada de resíduos urbanos (geração de patógenos, compostos tóxico-odorantes, contaminação de recursos hídricos circunvizinhos aos aterros, etc.).

Por fim, o trabalho discute as premissas para a análise econômica sobre a biodigestão anaeróbia de RSU visando à produção de biogás e biometano em aterro sanitário que foram contextualizadas a partir da caracterização dos principais custos, oportunidades, ferramentas para estimativas econômicas e políticas governamentais que podem auxiliar no desenvolvimento de projetos no âmbito da bioenergia.

As informações foram organizadas a partir de 155 referências bibliográficas. A distribuição das fontes utilizadas no presente estudo é apresentada na Figura 1.

Figura 1. Distribuição das referências bibliográficas utilizadas na revisão.



A geração de RSU no Brasil

As Políticas Nacionais de Resíduos Sólidos e de Saneamento Básico determinam que deve haver disposição adequada e o aproveitamento de resíduos, caso verifique-se viabilidade técnica, econômica e ambiental (BRASIL, 2018a). A disposição final ambientalmente adequada de RSU deve ser realizada em aterros, que devem ser planejados e projetados observando critérios de engenharia (BRASIL, 2010; BNDES, 2014).

O tamanho da população, a renda per capita, os fatores culturais e geográficos e o nível socioeconômico influenciam na quantidade de geração de RSU de um país. O tamanho da população tem relação direta com a oferta de produtos e, conseqüentemente, com o volume de resíduos direcionados ao tratamento ou descarte (BRASIL, 2018a; KAZA et al., 2018).

A geração de resíduos no mundo em 2016 foi de, aproximadamente, 2,01 bilhões de toneladas e a taxa de geração *per capita* variou em média entre 0,46 a 2,21 kg de RSU por pessoa ao dia. Estima-se que, em 2030, a geração anual de resíduos no mundo pode chegar a 2,59 bilhões de toneladas e, em 2050, 3,4 bilhões de toneladas (KAZA et al., 2018). Em 2019, a geração per capita de RSU dos brasileiros foi igual a 3,79 kg/ano, que resultou em 79 milhões de toneladas (ABRELPE, 2020).

Gerenciamento de RSU como fonte de emissão de GEE

As Políticas Nacionais de Resíduos Sólidos e de Saneamento Básico determinam que deve haver disposição adequada e o aproveitamento de resíduos, caso verifique-se viabilidade técnica, econômica e ambiental (BRASIL, 2018a). A disposição final ambientalmente adequada de RSU deve ser realizada em aterros, que devem ser planejados e projetados observando critérios de engenharia (BRASIL, 2010; BNDES, 2014).

O tamanho da população, a renda per capita, os fatores culturais e geográficos e o nível socioeconômico influenciam na quantidade de geração de RSU de um país. O tamanho da população tem relação direta com a oferta de produtos e, conseqüentemente, com o volume de resíduos direcionados ao tratamento ou descarte (BRASIL, 2018a; KAZA et al., 2018).

A geração de resíduos no mundo em 2020 foi de, aproximadamente, 2,1 bilhões de toneladas (UNEP, 2024). Estima-se que, em 2030, a geração anual de resíduos no mundo possa chegar a 2,59 bilhões de toneladas e, em 2050, 3,4 bilhões de toneladas (KAZA et al., 2018). Em 2022, a geração *per capita* de RSU dos brasileiros foi de, aproximadamente, 380 kg/ano, que resultou em 77,1 milhões de toneladas (ABREMA, 2023).

O gerenciamento de resíduos sólidos é uma temática importante para toda a população global (KAZA et al., 2018).

Resíduo sólido é um material, substância, objeto ou bem descartado de origem antrópica e RSU são aqueles que consistem de componentes inertes, biodegradáveis, recicláveis, que derivam de atividades domésticas em

residências urbanas e da varrição e limpeza de vias públicas (BRASIL, 2010; ALAO et al., 2022).

Os RSU ocasionam parcela significativa na emissão de GEE (THANH et al., 2010). A disposição final de resíduos em 2019 no Brasil resultou na emissão de, aproximadamente, 62 Mt de CO₂ equivalente (SEEG, 2020).

Cerca de 9,3% das emissões globais de GEE são relacionadas ao setor de gerenciamento de resíduos. As emissões de GEE podem ocorrer durante o armazenamento, coleta, transporte, reciclagem e disposição final dos resíduos em aterro, podendo durar várias décadas após o encerramento das atividades (BOGNER et al., 2007; KRISTANTO e KOVEN, 2019; HÖGLUND-ISAKSSON et al., 2020).

O biogás, resultante da disposição de resíduos em aterros, é formado principalmente por metano, dióxido de carbono e vapor d'água. Há compostos em menor proporção, como nitrogênio, oxigênio, amônia, óxidos de nitrogênio, siloxanos, material particulado, organoclorados, traços de hidrocarbonetos condensáveis e compostos sulfurados (USEPA, 1995; PETERSSON e WELLINGER, 2009; NAG et al., 2016; KORMI et al., 2018).

O metano, resultante da decomposição de matéria orgânica em aterros, é o maior responsável por impactos atmosféricos negativos do setor de gerenciamento de resíduos (BOGNER et al., 2007; KORMI et al., 2018).

O GWP do metano é 21 vezes maior que o do dióxido de carbono em relação ao efeito do gás na atmosfera em período de 100 anos. A vida útil do metano aumenta de acordo com alterações na concentração de radicais hidroxila (OH⁻), resultando em mudanças no ozônio troposférico e no aumento de níveis de vapor d'água estratosférico, relacionado à produção de CO₂ (FOSTER et al., 2007; USEPA, 2021a).

Além dos impactos relacionados às emissões de GEE, o gerenciamento de resíduos inadequado pode promover a contaminação dos oceanos, o bloqueio de canais de drenagem e causar inundações, a transmissão de doenças relacionada à reprodução de vetores e resultar em problemas respiratórios ocasionados pelas partículas produzidas na combustão de resíduos (KAZA et al., 2018). Adicionalmente, o lixiviado contaminado, que é resultante do tratamento de RSU, pode migrar para águas superficiais sensíveis ou poços de água potável e representar risco para os ecossistemas e saúde humana. Esses lixiviados de aterros sanitários contêm vários compostos químicos que podem permanecer por longo período de tempo em águas subterrâneas. Tais compostos são representados por matéria orgânica dissolvida, macrocomponentes (cátions e ânions), compostos orgânicos xenobióticos e metais pesados em alta toxicidade (CHRISTENSEN et al., 2001; INANC et al., 2007; PIVATO e GASPARI, 2006; VAVERKOVÁ, 2019).

Os métodos habituais de gestão de resíduos não são suficientes para solucionar a problemática que envolve a interminável geração de resíduos sólidos. Ainda que seja uma técnica globalmente aceitável, os aterros sanitários podem ser insustentáveis, pois há diversos riscos ambientais associados à planta e necessidade de longo período para a estabilização dos materiais orgânicos (SCAGLIA et al., 2010; YI; JANG; AN, 2018).

A adoção de técnicas de separação de materiais recicláveis e aproveitamento energético de resíduos no setor de gerenciamento de RSU pode acarretar em redução de até 82% das emissões globais de metano entre 2020 a 2050 (HÖGLUND-ISAKSSON et al., 2020). O potencial de geração de energia elétrica em aterros sanitários no Brasil é em média de 1,3 GW, o que pode evitar a emissão de aproximadamente 3,8 MtCO₂ por ano (SANTOS et al., 2018a).

Os principais parâmetros que determinam as características de sistemas de produção de energia a partir de resíduos são a disponibilidade de matéria prima, as características, a composição e conteúdo energético dos resíduos, além da tecnologia de conversão energética (IEA e FAO, 2017; IRENA, 2020c; ALAO et al., 2022). O aproveitamento do potencial energético de RSU é uma alternativa de tratamento de resíduos sólidos, que pode ser dividida em duas categorias: (i) tecnologias de conversão biológica, configurada por métodos como a recuperação de gás em aterros sanitários, e a digestão anaeróbica de resíduos orgânicos; e, (ii) tecnologias de conversão térmica, que inclui a produção de combustíveis através de gaseificação, pirólise e incineração de RSU (MALKOW, 2004; RADA, 2014; DEDINEC et al., 2015; YI; JANG; AN, 2018; LIU et al., 2022).

Impactos ambientais e emissão de GEE na produção de energia

A emissão de GEE é a principal causa das mudanças climáticas na era industrial (WUEBBLES et al., 2017). As tempestades de alta intensidade, incêndios florestais, secas rigorosas, branqueamento de corais, ondas de calor e enchentes são alguns indícios das mudanças climáticas que ameaçam a estabilidade socioeconômica do mundo (KORMI et al., 2017; BRASIL, 2020c).

O setor de fornecimento de energia, formado por processos de extração, armazenamento, transmissão e distribuição, é o maior emissor global de GEE e contribuiu com 73% do total de emissões de GEE de origem antrópica em 2016 (BRUCKNER et al., 2014; WRI, 2022). Em 2019, no Brasil, as emissões de GEE relacionadas à geração de energia elétrica foram de 56,3 MtCO₂ (megatoneladas de dióxido de carbono); o Sistema Interligado Nacional (SIN) foi responsável por 61% do total de emissões de GEE, a autoprodução por 30,3%, e os sistemas isolados, 8,1% (BRASIL, 2020d).

As emissões de GEE do setor de energia são relacionadas principalmente à queima de combustíveis fósseis e a maior parcela tem origem no setor de transportes, apesar da grande produção e consumo de biocombustíveis (BRASIL, 2020c). Em 2017, 8 GtCO₂ (gigatoneladas de dióxido de carbono), ou seja, 25% do total de CO₂ emitido no mundo teve origem no setor de transportes (IRENA, 2020c).

A combustão interna de combustíveis fósseis em motores e turbinas resultam em emissões do setor de transporte, que incluem uma variedade de poluentes como o CO₂, o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, materiais particulados, dentre outros (IRENA, 2020c). Cada combustível produz concentrações específicas de CO₂ em relação à quantidade de energia.

Por exemplo, o biometano emite 52,07 kgCO₂/mmBtu (“British thermal unit”, unidade térmica britânica), o gás natural emite 53,02 kgCO₂/mmBtu, enquanto que a gasolina (sem adição de etanol) e o diesel emitem 70,22 kgCO₂/mmBtu e 73,96 kgCO₂/mmBtu, respectivamente (USEPA, 2009).

As emissões globais de CO₂ oriundas da produção de energia aumentaram 1% ao ano durante a última década. Caso esse padrão de emissão continue crescendo à taxa de 0,7% ao ano, as emissões totais passariam de 34 GtCO₂, em 2019, para 43 GtCO₂ em 2050, levando ao aumento de temperatura global de 3°C (ou superior) até a segunda metade do século (IRENA, 2020d).

Esse cenário de impactos ambientais negativos relacionados às mudanças climáticas conduz à necessidade de transformação rápida e radical no setor de energia, com foco na substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, bem como na redução do consumo total de energia e no aumento da eficiência energética (IRENA, 2020b). A melhoria da eficiência energética permite que a população utilize energia com menores custo e impacto ambiental, o que pode promover o desenvolvimento de benefícios sociais, econômicos e ambientais (CTCN, 2019).

A importância do biogás e biometano para o desenvolvimento da bioenergia no Brasil

A bioenergia é uma importante alternativa para o desenvolvimento energético-sustentável pois apresenta fontes para produção de combustível com grande potencial de crescimento (BRASIL, 2020a; IRENA, 2020a).

Bioenergia corresponde à transformação físico-química de materiais sólidos, líquidos e gasosos oriundos da biomassa em energia (IEA e FAO, 2017). Biomassa é matéria orgânica, de origem animal ou vegetal com característica não-fóssil, que apresenta energia química armazenada e pode ser utilizada como fonte primária de energia (BRASIL, 2020b).

A forma de energia renovável mais utilizada no mundo é a bioenergia, representando, a nível global, cerca de 70% do total de energia renovável e 10% do total de energia primária. Aproximadamente 25% do total de bioenergia produzida no mundo é utilizada no setor de transportes, principalmente como combustíveis líquidos obtidos a partir de culturas agrícolas, como cana-de-açúcar e milho (IRENA, 2020a).

O Brasil produz 8% do total de bioenergia disponível no mundo, que corresponde a 70 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). O aproveitamento bioenergético representou mais de 30% da demanda energética nacional em 2018 e estima-se que o potencial energético da biomassa, em 2050, será de 530 milhões de tep (BRASIL, 2018a; BRASIL, 2020a).

A oferta de energia renovável pode ser estimulada a partir do desenvolvimento de produtos energéticos, como biogás e biometano, oriundos da cadeia produtiva da biomassa (BRASIL, 2018a). Estima-se que os resíduos da agroindústria, pecuária e saneamento poderiam resultar em 19 GW de capacidade instalada visando, a produção de energia elétrica ou 120 milhões de metros cúbicos de biometano por dia (ABIÓGÁS, 2020).

Porém, apesar do potencial de aproveitamento de biogás, a capacidade instalada de usinas de geração de energia elétrica que utilizam biogás no Brasil em 2019, foi de apenas 186 MW, e em 2020, 206 MW (BRASIL, 2020b; BRASIL, 2021a). A potência outorgada de usinas termoelétricas em operação no país que utilizam biogás de RSU como combustível foi de aproximadamente 201,89 MW até a data de 13 de abril de 2023 (BRASIL, 2022a). Hipoteticamente, a utilização de todo o potencial de produção de biogás poderia suprir 34,5% da demanda de energia elétrica do Brasil (ABIOGÁS, 2022).

O conteúdo energético do biogás é proporcional à concentração de metano. O biometano pode ser obtido a partir da remoção de contaminantes presentes no biogás, como gás carbônico, compostos sulfurados, nitrogênio, halogenados, particulados, vapor de água, e outros compostos-traços perigosos, como hidrocarbonetos clorados e fluorados, ácidos orgânicos e inorgânicos, e amônia (PETERSSON e WELLINGER, 2009; MESCIA et al., 2011; BRASIL, 2017a; BRASIL, 2018b).

As propriedades do biometano e do gás natural são equivalentes e, portanto, esse biocombustível é apropriado para ser utilizado como combustível veicular e gerar energia elétrica ou térmica nos setores industrial, comercial, institucional ou residencial (USEPA, 2021a).

O biometano obtido a partir de biogás era produzido em 700 usinas ao redor do mundo em 2019 (WBA, 2019). Nesse mesmo ano, no Brasil, foi estimado o potencial de produção de biometano a partir da geração de resíduos dos setores sucroenergético, agroindústria e saneamento em 21,06 bilhões de Nm³, 19,55 bilhões de Nm³ e 2,62 bilhões de Nm³, respectivamente. O aproveitamento de todo potencial de produção de biometano resultaria em quantidade equivalente a 70% da demanda de diesel do país (ABIOGÁS, 2020; ABIOGÁS, 2022).

Tecnologias térmicas para produção de energia a partir de RSU

Os processos termoquímicos utilizam altas temperaturas que efetuam a decomposição de carbonáceos e matéria orgânica para produção de energia, óleo combustível, gás, e outros subprodutos como carvão vegetal (ALAO et al. 2022).

A incineração é uma tecnologia de decomposição térmica para aproveitamento do poder calorífico de resíduos, resultando em energia através de combustão com excesso de oxigênio, chegando a temperaturas superiores a 800°C em fornos ou caldeiras sob alta pressão (TAN et al., 2015; RODRIGUES et al., 2022). A incineração de RSU é globalmente empregada para conversão de biomassa em eletricidade e é utilizada para incinerar grande quantidade de resíduos (MURPHY e MCKEOGH, 2004; LIU et al., 2022).

Porém, há duas principais desvantagens relacionadas a essa tecnologia: (i) uma planta moderna de incineração apresenta máxima eficiência elétrica de 22% (MURPHY e MCKEOGH, 2004); e, (ii) a incineração de RSU produz dioxinas e outros compostos tóxicos, o que aumenta o custo de tratamento de poluentes (MCKAY, 2002; LIU et al., 2022).

De acordo com Silva et al. (2020), projetos de produção de energia a partir de processo de incineração de RSU no Brasil são economicamente viáveis apenas em casos de municípios com população a partir de, aproximadamente, 1,41 milhões de habitantes e exclusivamente para tarifas de venda de energia elétrica iguais ou maiores a US\$77 por MWh (megawatt-hora). Os autores constataram que não há viabilidade econômica desses projetos para os valores de tarifa de energia do mercado brasileiro devido aos altos custos de instalação, operação e manutenção das plantas, além dos altos custos dos sistemas de controle e tratamento de gases e poluentes.

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica em que ocorre a combustão parcial da matéria-prima a temperaturas mínimas de 1100°C, com controle da concentração de ar ou oxigênio, capaz de converter matéria orgânica sólida em combustíveis gasosos formados principalmente de monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e hidrogênio (TAN et al., 2015; YANG et al., 2018).

A produção de energia térmica do processo de gaseificação é significativamente menor que do processo de incineração, pois o gás perde calor no contato com a turbina de ciclo combinado. Em contrapartida, a gaseificação de RSU apresenta maior eficiência elétrica que a incineração (MURPHY e MCKEOGH, 2004).

As limitações dos projetos de gaseificação são relacionadas às características da matéria prima, que deve ser uniforme e com baixo teor de umidade, e à formação de cinzas. A utilização de RSU para a gaseificação pode apresentar problemas visto que essa biomassa apresenta alto teor de umidade e de cinzas, além de baixo poder calorífico (SAJID et al. 2022). Dessa maneira, deve haver secagem da biomassa em etapa anterior ao processo de alimentação do reator de gaseificação (HAN et al., 2017).

O sucesso de uma planta de gaseificação de grande escala exige alto investimento de capital (SAJID et al., 2022). Rodrigues et al. (2022) realizou análise econômica para a implantação de projetos de gaseificação em municípios do Brasil e não encontrou viabilidade econômica em nenhum cenário, visto que os equipamentos apresentam custos altos e os valores de tarifa de venda de energia baixos e não acarretam em retorno sobre os investimentos da planta.

A pirólise é caracterizada como a transformação térmica de compostos orgânicos na ausência de oxigênio em temperaturas acima de 500°C, em que a matéria-prima pode ser convertida em biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos (YANG et al., 2018; HASAN et al., 2021). Os RSU apresentam diversas frações de componentes distintos e tais componentes apresentam comportamentos diferentes no processo de pirólise. Uma vez que o tratamento de resíduos em países em desenvolvimento é ineficiente em relação à separação dos componentes dos RSU, a heterogeneidade representa uma barreira técnica-econômica para o processo de pirólise (HASAN et al., 2021).

Os altos custos de equipamentos são os parâmetros mais sensíveis em um cenário de produção de energia a partir da pirólise. Os custos de produção podem ser reduzidos, se houver possibilidade de arrecadar receita com a venda de subprodutos da pirólise, porém o mercado

desses subprodutos ainda precisa ser desenvolvido (RAHMAN et al., 2022).

De acordo com Sipra et al. (2018), a pirólise é o processo termoquímico com melhor eficiência ambiental. Os processos de pirólise e gaseificação de RSU podem contribuir para a redução da corrosão em sistemas de combustão e da emissão pois retêm metais pesados, enxofre e cloro no produto residual do processo, além de evitar a formação de dibenzo-p-dioxina/-furanos e óxidos de nitrogênio devido à utilização de altas temperaturas. Adicionalmente, na gaseificação e pirólise são destruídos diversos compostos perigosos. Logo, os equipamentos para o tratamento de emissões de poluentes desses processos apresentam custo reduzido. Porém, os produtos desses processos ainda podem conter gases corrosivos como o ácido clorídrico e o ácido sulfídrico (HASAN et al., 2021; SIPRA et al., 2018; MALKOW, 2004).

Os combustíveis produzidos a partir da gaseificação e pirólise podem ter diversas aplicações energéticas, pois contêm alto poder calorífico, e podem ser utilizados como gás natural sintético (syngas) como matéria-prima de produção para diversos compostos químicos (MALKOW, 2004; LEE; LU; CHANG, 2020).

Tecnologias biológicas para produção de energia em aterros sanitários

A conversão energética de resíduos através de tecnologias bioquímicas, como a biodigestão anaeróbia e recuperação de biogás, apresentam maior eficiência ambiental em relação às tecnologias termoquímicas, pois utilizam microrganismos no processo de conversão (KALYANI e PANDEY, 2014).

Os processos de conversão bioquímica são relacionados à decomposição da fração orgânica biodegradável de RSU sob ação bacteriana, que pode ocorrer na ausência ou presença de oxigênio. A ação da microbiota é favorecida quando os resíduos apresentam percentagem de matéria orgânica e teor de umidade elevados e, portanto, nesses casos é preferível utilizar processos bioquímicos para a conversão energética (ALAO et al., 2022).

No aterro sanitário, a fração orgânica do RSU entra em estado de biodegradação, produzindo em lixiviado líquido e biogás (CHEN et al., 2016). A recuperação de biogás em aterros sanitários pode propiciar a produção de energia (SANTOS et al., 2019). O biogás de aterro sanitário pode ser coletado através de redes de tubulações instaladas nas células do aterro sanitário (MANASAKI et al., 2021). No entanto, a concentração de metano no biogás de aterro sanitário varia ao longo do tempo pois ocorrem alterações em fatores atmosféricos e físico-químicos relacionados ao metabolismo da comunidade microbiana responsável pela biodegradação da fração orgânica do RSU (USEPA, 2021b; VAN TIENEN et al., 2021).

A literatura apresenta análises econômicas com resultados distintos que podem ser relacionados às diferenças nas rotas tecnológicas, nos sistemas de tratamento, nos investimentos e nos custos de operação e manutenção da planta, na tarifa de venda do recurso

energético, às regiões em que as plantas são projetadas, entre outros.

A maximização do valor do biogás de aterro sanitário é relacionada a diversas condições, como disponibilidade de mercado de energia, custos de projeto, fontes potenciais de receitas e considerações técnicas (USEPA, 2021b). De acordo com Barros et al. (2014), os projetos de recuperação de biogás em aterros sanitários para geração termelétrica apresentam viabilidade econômica em municípios brasileiros com ao menos 200.000 habitantes. Complementarmente, Brito et al. (2021) afirmam que regiões com maiores níveis de geração de resíduos propiciam maior viabilidade econômica de usinas termoeletricas que utilizam o biogás recuperado de aterros sanitários. É importante ressaltar que, de acordo com Ribeiro et al. (2021), o valor da tarifa de energia é o componente que apresenta maior impacto na viabilidade de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de rotas de tecnologia biológica de RSU.

Silva et al. (2022) analisaram o potencial de produção de biometano para uso veicular a partir da recuperação de biogás em consórcios de aterros sanitários da região sudoeste do Brasil e constataram que há viabilidade econômica em casos de produção de biogás acima de 5500 m³/dia, e confirmaram que o Estado de São Paulo apresenta o maior potencial de produção de biometano. De acordo com os autores, os Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo poderiam evitar a emissão de, aproximadamente, 29,1 trilhões de toneladas de CO₂ se o biometano fosse utilizado em substituição ao óleo diesel.

Parker et al. (2017) analisaram cenários de produção de biometano em aterros sanitários da Califórnia, nos Estados Unidos da América, e constataram que a produção do biocombustível a partir da recuperação de biogás de células de aterros sanitários apresentam melhor viabilidade econômica em relação à produção de biometano a partir de processo de biodigestão anaeróbia da FORSU, caso não sejam consideradas políticas públicas de incentivo à produção. De acordo com os autores, o custo estimado para a coleta do biogás no aterro sanitário, para a purificação em biometano e injeção do biocombustível para abastecimento, é de US\$ 6,00 a US\$ 16,8 por Gigajoule (GJ). Porém, Padilha e Mesquita (2022) realizaram estudos sobre varios cenários de produção de energia elétrica em aterros sanitários no Brasil e afirmam que a utilização de biodigestores aneróbios propiciou maior produção de energia elétrica em relação à quantidade de habitantes em comparação à recuperação de biogás.

Uma vez que seja garantida a viabilidade do investimento, a implantação de biodigestores anaeróbios na gestão de RSU pode ser considerada em municípios com população entre 30 mil e 250 mil habitantes (BNDES, 2014). A geração de energia elétrica tanto em sistemas de recuperação de biogás de aterro quanto em processos de biodigestão anaeróbia da FORSU podem apresentar resultados semelhantes, mas sistemas de recuperação de biogás apresentam melhores resultados econômicos (RIBEIRO et al., 2021).

A utilização de biogás de FORSU obtido a partir da biodigestão anaeróbia para produção de energia térmica pode ser mais interessante em termos econômicos do que

para geração de eletricidade (BRITO et al., 2021). Entretanto, de acordo com Padilha e Mesquita (2022), as rotas tecnológicas de gerenciamento de RSU que fazem uso da triagem de material reciclável e biodigestão anaeróbica da FORSU, visando à produção de energia elétrica, apresentam resultados economicamente atrativos para geração de energia elétrica em municípios com população menor que 250 mil habitantes, com taxa de contribuição de US\$3,23 por habitante ao mês, retorno de investimento em 20 anos, e taxa interna de retorno de 11,61%.

Biodigestão anaeróbica de FORSU para produção de energia

A biodigestão anaeróbica é uma tecnologia que utiliza microrganismos para a decomposição da fração orgânica dos resíduos na ausência de oxigênio e produz biogás e digestato (ALAO et al., 2022). A biodigestão anaeróbica apresenta diversos benefícios ambientais, como produção de energia, recuperação de nutrientes e redução do volume de resíduos (BEYENE, 2018). A utilização de FORSU em sistemas de biodigestão anaeróbica, além de diminuir as emissões de GEE de aterros sanitários e produzir biocombustível ou energia elétrica, pode ser uma ferramenta importante de gestão de RSU no Brasil, principalmente em municípios com pequena população (CANADA, 2013; PAES et al., 2020).

A digestão anaeróbica pode propiciar a biorremediação e estabilização de resíduos em conjunto com a geração de bioenergia, tornando-se uma eficiente tecnologia de mitigação de GEE relacionados à disposição de resíduos em aterros (BOGNER et al., 2007; SAWATDEENARUNAT et al., 2015). O direcionamento de materiais orgânicos presentes em RSU para o processo de digestão anaeróbica reduz as emissões de metano e produção de poluentes secundários resultantes da biodegradação de resíduos em aterros sanitários, o que pode evitar a emissão de 2,3 kg de CH₄/t de resíduo. (LIU et al., 2012; CANADA, 2013; ABRELPE, 2020).

Cerca de 50% dos RSU é composto por matéria orgânica, representada por papel, material animal e vegetal, resíduos de jardinagem, que pode ser biodigerida e aproveitada como biogás e biofertilizante, que corresponde ao produto sólido da digestão anaeróbica com potencial de evitar emissões de GEE e uso de energia relacionados à produção e transporte de fertilizantes inorgânicos (PETERSSON e WELLINGER, 2009; ARIUNBAATAR et al., 2014; LEE; HAN; WANG, 2016; ABIOGÁS, 2020). Outras vantagens ambientais do aproveitamento do resíduo para a produção de energia é a redução do volume de rejeitos a serem encaminhados para disposição no aterro e concomitantemente, a utilização de menores áreas para aterros sanitários e aumento da vida útil da planta, além de redução das emissões de GEE do aterro (ABRELPE, 2015; BRASIL, 2014a; LEE et al., 2017).

Tanto em aterros de RSU quanto em digestores anaeróbicos, o biogás e o biometano são obtidos a partir da metanogênese por via biológica, que é composta por três etapas: (i) hidrólise de compostos orgânicos de alto peso molecular; (ii) transformação de moléculas de cadeia curta

em ácidos graxos voláteis; (iii) produção de hidrogênio, dióxido de carbono e metano a partir de, principalmente, ácido acético (HENZE e HERREMOËS, 1983; HILAIRE et al., 2017).

O processo de bioconversão anaeróbica de resíduos é influenciado pelos seguintes fatores: (i) taxa de carga orgânica; (ii) rendimento de biomassa; (iii) taxa de utilização de substrato; (iv) tempo de retenção hidráulica; (v) tempo de retenção de sólidos; (vi) tempo de inicialização; (vii) microbiologia; (viii) fatores ambientais; (ix) e configuração do reator (KHANAL, 2008).

El Ibrahim et al. (2021) analisaram cenários de produção de energia a partir da biodigestão anaeróbica de FORSU em Marrocos, e constataram a viabilidade econômica para a produção de biometano apenas em cenário de grandes cidades, como Casablanca, que apresenta, aproximadamente, 3,6 milhões de habitantes.

Em relação à produção de biometano, Cucchiella et al. (2019) analisaram o potencial de produção do biocombustível para uso veicular a partir da biodigestão da FORSU em municípios da Itália, e constataram que há viabilidade econômica para cenários em que a produção de biometano ultrapasse a taxa de 200 m³/h. Jagtap e Dalvi (2021) realizaram estudos sobre o potencial de produção de biometano na Índia a partir de RSU com utilização de biodigestores anaeróbicos e concluíram que o biocombustível pode apresentar preço competitivo em relação ao gás natural, se houver subsídios do governo e redução de 3% sobre a taxa de juros, de modo que o período de retorno de investimento pode passar de 10,3 anos para 6,26 anos.

Características de infraestrutura e operação de sistema de produção de biogás e biometano via biodigestão anaeróbica da FORSU

A produtividade de biogás e os investimentos em infraestrutura e operação da planta dependem diretamente da eficiência de operação do biodigestor, da biodegradabilidade e do potencial energético da matéria-prima (CANADA, 2013; EC, 2017).

A tecnologia de biodigestão de substratos com alto valor energético mais utilizada no mundo são os sistemas de biodigestão anaeróbica do tipo reator de tanque em fluxo contínuo (CSTR - *continuous stirred tank reactor*), projetados para operar em meio aquoso em tanques com agitação. Esses biorreatores são apropriados para matérias-primas com baixos teores de sólidos e suportam misturas com materiais de altos teores considerando o limite do teor de umidade para a operação entre 80 a 85%. Em razão disso, geralmente etapas de pré-tratamento visando a umidificação e a homogeneização de resíduos são necessárias, o que, sincronicamente, resulta em vantagens para o transporte via bombeamento da mistura (CANADA, 2013; BRASIL, 2015). A agitação e aquecimento do CSTR asseguram o contato ativo entre substratos e microrganismos, além de manter a temperatura de operação adequada, uma vez que: processos termofílicos requerem temperaturas maiores que 45°C; processos mesofílicos na faixa entre 20°C e 45°C; e processos psicofílicos, inferiores a 20°C (CANADA, 2013; PIÑAS et al., 2018).

Os quatro principais estágios técnicos que devem ser considerados em sistemas de digestão anaeróbia são o pré-tratamento, a digestão de resíduos, a recuperação de biogás e o tratamento dos resíduos digeridos (BNDES, 2014). Uma planta que produz energia através da utilização de CSTR pode apresentar (ABAD et al., 2019; PIÑAS et al., 2018): (i) tanque de preparação para pré-tratamento a seco, visando à remoção de materiais recicláveis e de impurezas inorgânicas; (ii) tratamento úmido, visando à remoção de compostos pesados, como areia, vidro, resíduos de jardinagem etc; (iii) tratamento biológico baseado em processo de digestão anaeróbica mesofílico utilizando resíduo úmido; (iv) tanque de armazenamento do resíduo digerido (digestato); (v) gasômetro; (vi) sistema combinado de aquecimento e energia; (vii) compostagem do digestato desidratado; e, (viii) pós-tratamento para purificar o biogás (obtenção do biometano).

O pré-tratamento seco é uma etapa preliminar realizada via processos de peneiramento mecânico em tambor, separação balística e processo magnético para retirada de metais. A fração orgânica é destinada ao processo de umidificação com utilização de despolpadores e homogeneizadores que misturam a biomassa com água para obter solução com características específicas em relação à concentração de matéria seca. Ocorre a extração dos resíduos pela parte inferior do despolpador e o líquido suspenso é peneirado e destinado ao hidrociclone para remoção de areia. Ao final da etapa de pré-tratamento, o volume de matéria orgânica resultante vai para o tanque de alimentação e, então, para o reator anaeróbico (ABAD et al., 2019).

A biodegradação anaeróbica ocorre por meio de ataque bacteriano à área superficial da FORSU, o que justifica a necessidade dos processos de maceração e pulverização da matéria orgânica a fim de aumentar a biodegradabilidade e favorecer a hidrólise (PRANIGRAHI e DUBEY, 2019). Em estado termofílico ou mesofílico, a digestão anaeróbica pode durar entre 14 a 40 dias. Digestores do tipo CSTR produzem biogás, efluente e digestato líquido, que pode ser desidratado através de centrifugas, prensa de filtro de correia ou prensa de parafuso, e utilizado como biofertilizante. (CANADA, 2013).

As tecnologias de digestão anaeróbia a seco operam com maior concentração de sólidos. Entretanto, em comparação com tecnologias de digestão anaeróbica a seco, os sistemas CSTR apresentam (CANADA, 2013; BRASIL, 2015): (i) alta eficiência de produção de biogás; (ii) alta estabilidade de processo; (iii) controle de emissões de metano; (iv) potencial de operação com fluxo contínuo de alimentação com resíduos em estado líquido ou pastoso, e capacidade de biodigestão entre 3 mil a 250 mil toneladas de fração orgânica por ano; e, (v) sistema com alto nível de controle de odor, uma vez que toda a operação é realizada em meio confinado. Dentre as desvantagens da utilização desse sistema, incluem-se: (i) a necessidade de pré-tratamento significativo e cuidados com o limite de capacidade operacional, visto que apresentam pouca eficiência com resíduos contaminados com plástico, metais e rochas, que, também, podem desgastar os equipamentos mecânicos; (ii) a necessidade de infraestrutura de armazenamento em etapa anterior à

biodigestão, visando manter o fluxo homogêneo; (iii) a produção de maior quantidade de efluente; e, (iv) o consumo de maior quantidade de energia.

O aproveitamento do biogás demanda a remoção de componentes não-energéticos, o que aumenta a concentração de metano por volume de biocombustível e garante a preservação da segurança e integridade dos equipamentos e dos componentes relacionados à saúde humana no que se refere à exposição ocupacional (PETERSSON e WLLINGER, 2009; BRASIL, 2017a; ATELGE et al., 2021; USEPA, 2021a).

A escolha do sistema de purificação de biogás é condicionada a fatores que envolvem as características finais do biometano, a disponibilidade de suprimentos e equipamentos, as condições operacionais da usina e a composição e faixa de vazão do biogás (CANADA, 2013). Ainda, a tecnologia de purificação de biogás pode ocasionar efeitos sobre a produtividade de biometano e o consumo energético da planta (RAJENDRAN et al., 2019).

Há diversos métodos que podem ser empregados para a purificação de biogás, como adsorção química ou física, absorção de gás, condensação lavagem com solventes líquidos específicos, conversão catalítica e separação por membrana (ATELGE et al., 2021).

As tecnologias de purificação de biogás para produção de biometano mais acessíveis economicamente são a absorção com oscilação de pressão e a lavagem com água. Entretanto, há diferentes métodos em desenvolvimento contínuo, como a absorção com aminas, que apresenta maior eficiência na remoção de gases ácidos presentes no biogás, em comparação à absorção com água, e resulta em menor perda de biometano durante o processo (CANADA, 2013; CAVAGNAC et al., 2021).

Após a remoção de contaminantes e de conteúdo não-energético presentes no biogás, o biometano deve apresentar padrão de qualidade relacionados à sensibilidade dos componentes dos sistemas de utilização aos elementos presentes no gás (ABIÓGÁS, 2020; IRENA, 2020b).

Análise de investimentos para a produção de biogás, biometano e energia elétrica

Há diversos estudos que comprovam a viabilidade econômica de projetos de geração de energia a partir de RSU, visando à produção de biogás e/ou biometano, obtidos de diferentes quantidades de resíduos em diferentes rotas tecnológicas (BARROS et al., 2014; RAJENDRAN et al., 2014; CZYRNEK-DELÈTRE et al., 2016; MOULOD et al., 2016; CUCCHIELLA et al., 2018; RANIERI et al., 2018; SANTOS et al., 2018b; SANTOS et al., 2019; PAES et al., 2020; MARTÍN-PASCUAL et al., 2020; DYER et al., 2021; PADILHA e MESQUITA, 2022).

O desempenho econômico e a lucratividade de investimentos de empresas de prestação de serviços do setor de RSU podem ser garantidos a partir de recurso de análise de risco, denominado valor presente líquido (VPL), que pode identificar a taxa necessária para se obter retorno de capital para viabilidade do projeto de tratamento da FORSSU (MARTÍN-PASCUAL, 2020).

Valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR) são métodos econômicos empregados para analisar a lucratividade de projetos. O VPL aponta o valor agregado do projeto relacionado ao valor do investimento (LUZ et al., 2015). A atratividade financeira do projeto depende da dimensão do valor positivo estimado no VPL. A precisão do VPL é correlata à validação da taxa de desconto considerada, que dificilmente é estimada com exatidão (MASEBINU et al., 2018).

A TIR é a taxa de desconto, que iguala o valor dos fluxos de caixa futuros ao valor de investimento do projeto (GEBREZGABHER et al., 2010). Há viabilidade econômica para o projeto de biogás quando a TIR é maior que a taxa de desconto utilizada (MASEBINU et al., 2018). Portanto, o investimento no projeto é economicamente mais atrativo se o VPL for maior que zero e, simultaneamente, a TIR apresentar o maior valor possível (LUZ et al., 2015).

As metodologias de cálculo da TIR calculadas a partir da média entre as diversas fontes de financiamento (custo médio ponderado de capital), resultam em quantias inferiores às ideais para viabilizarem investimentos de acordo com o nível de risco do projeto (GONÇALVES, 2015). O setor de energia apresenta riscos de investimento característicos do sistema elétrico, representados pelas incertezas sobre a evolução do consumo de energia, a capacidade de atender a demanda e os preços, que podem acarretar em retorno de investimento insuficiente para o projeto (CASTRO e LYRA FILHO, 2005).

O investimento em projetos acarreta em custo implícito sobre a renúncia de investimentos em projetos diferentes. Nesse contexto, o recurso financeiro compreende um custo de oportunidade que garante a lucratividade. Por isso, entradas e saídas de projetos são vinculadas à taxa mínima de atratividade (EC, 2014). Diversas análises econômicas de projetos de produção de energia por meio de RSU apresentam taxa mínima de atratividade entre 10% e 15% (GEBREZGABHER et al., 2010; BARROS et al., 2014; LUZ et al., 2015; SILVA et al., 2017; SANTOS et al., 2018b).

O custo nivelado de eletricidade (LCOE - *levelised cost of electricity*) é a principal ferramenta de comparação entre custos unitários da planta de produção de energia elétrica em diferentes tecnologias ao longo de sua operação. Esse parâmetro caracteriza os custos econômicos de maneira genérica e pode ser utilizado em mercados regulados que não apresentam preços variáveis. Entretanto, ao utilizar ajustes na taxa de desconto para o custo implícito relacionado à volatilidade de preços, esse parâmetro pode ser utilizado em cenários de mercados desregulados. Para a análise da melhor tecnologia, costumava-se escolher o cenário com menor valor de LCOE; entretanto as tecnologias renováveis ocasionaram mudanças no mercado relacionadas à oferta e procura, o que resultou em mudanças sobre esse padrão de análise (NEA, 2020).

Há outras ferramentas econômicas padronizadas, como: o prazo de retorno de investimento (PRI), para correlacionar a receita anual com o investimento total da planta e resulta no tempo necessário para compensar o investimento inicial; e o índice de rentabilidade (IR), para quantificar o valor agregado do projeto em razão da

unidade de investimento (CUCCHIELLA et al., 2018; MASEBINU et al., 2018).

Atualmente no Brasil, estima-se que o prazo de retorno de investimentos de empreendimentos de geração de energia a partir da biodigestão anaeróbia da FORSU em pequenos municípios seja de 20 anos, com taxa interna de retorno de 11,61%. A taxa de coleta de RSU é muito atrativa economicamente para o contribuinte, visto que o valor estabelecido da contribuição da população para a execução do serviço varia entre 1,1 e 3,6 milhões de dólares por ano (PADILHA e MESQUITA, 2022).

É importante destacar que diferentes taxas de juros, variação cambial ou alterações no projeto são flutuações em custos e investimentos que podem inviabilizar projetos (BRASIL, 2016). Critérios para análise de custos de plantas de produção de energia variam entre, ou mesmo dentro, dos países. Logo, premissas, como assumir um fator de capacidade constante ou preço de combustível adequado, são necessárias a fim de simplificar a análise econômica e possibilitar a comparação de resultados (IEA e NEA, 2020).

Custos e oportunidades da produção de biometano e energia elétrica a partir de RSU

A análise econômica necessita de determinados parâmetros para a construção do fluxo de caixa, iguais às entradas e saídas de caixa relacionados às receitas, investimentos e custo de operação e manutenção. Esses fluxos de caixa são estruturados em termos reais, moeda constante, e com ano-base coerente com as informações de aplicação (BRASIL, 2018a).

O custo de tratamento de resíduos em aterros sanitários é, geralmente, formado por custos com trabalhadores, custos com energia para operação da usina, custos de manutenção, limpeza e tratamento de águas residuais, custos de transporte e descarte de rejeitos, entre outros (ABAD et al., 2019). A formação do custo de produção de biogás através de biodigestores anaeróbicos implantados em aterros sanitários envolve o tipo de substrato, da tecnologia, os investimentos necessários e a possibilidade de distribuição do biofertilizante na área agrícola circundante. Para a produção de biometano, há custos adicionais referentes ao investimento em infraestrutura e operação (EC, 2017).

Há algumas maneiras de faturar com projetos de biogás a partir de RSU (BRASIL, 2016; BRASIL, 2018a; ABAD et al., 2019; MARTÍN-PASCUAL, 2020): (i) monetização da produção de biometano através da venda de energia para o mercado de eletricidade, de acordo com regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e comercialização de biocombustível para uso residencial, industrial e veicular; (ii) contratos com municípios para prestação de serviços de gerenciamento de RSU; (iii) comercialização de biofertilizante e materiais recicláveis; e (iv) redução de custos sobre o volume de materiais aterrados, visto que a utilização de tratamento anaeróbico da FORSU pode reduzir em até três vezes o conteúdo de resíduos destinado à disposição final em relação ao volume de RSU inicialmente coletado.

Há pontos que devem ser considerados sobre a viabilidade de empreendimentos de produção de

biometano, como (USEPA, 2021a): (i) quantidade e qualidade do biogás disponível para conversão em biometano através da remoção de compostos “não-energéticos”; (ii) considerações econômicas, como opções de financiamento, incentivos disponíveis; e, (iii) disponibilidade para o usuário final do biocombustível, como a proximidade de um gasoduto, interesse de uma empresa de distribuição em receber o biocombustível, ou demanda local do biocombustível para uso veicular.

Os altos custos de uma usina de biometano de RSU podem ser relacionados principalmente ao grande volume de material sólido para processamento, o que interfere diretamente nos custos de produção e remoção de impurezas do biogás (RAJENDRAN et al., 2019). De acordo com Parker et al. (2017), o custo dos biodigestores está relacionado à capacidade de instalação de equipamentos. Os autores afirmam que a construção de maior quantidade de biodigestores pode propiciar economia de 10% para os suprimentos de menores custos da planta, porém, ao preço de aumentar os custos dos componentes mais caros em até 60%. De acordo com Brito et al. (2021), os custos dos equipamentos trituradores em sistemas de biodigestão anaeróbia de FORSU podem inviabilizar projetos de produção energia elétrica a partir de RSU.

O maior custo de produção de biometano é referente à remoção de CO₂ do biogás, que aumenta de acordo com a capacidade de produção da planta, mas reduz gradativamente por unidade de capacidade (PERSSON et al., 2006). Entretanto, é importante salientar que os custos de retirada do CO₂ do biogás para produção de biometano são relativamente menores que os custos de captura de CO₂ na pós-combustão de biogás e biometano utilizados em sistemas de combustão ou de incineradores, o que pode motivar a utilização de biometano em sistemas de geração de energia ou como biocombustível de transporte fundamentada no princípio de redução de emissões de GEE (SALOMONI et al., 2011).

Cavaignac et al. (2021) confirmam que há viabilidade na utilização do solvente diglicolamina para remoção de impurezas do biogás em plantas de média e grande escala, reportando a remoção de até 99% de CO₂, que resultou em biocombustível com concentração de metano de 91%. Esse processo teve custo de compressão reduzido e menor demanda de energia, acarretando em rentabilidade com a venda de biometano à US\$ 0,38/m³.

Os custos de tecnologias de geração de energia e de sistemas de fornecimento de energia são essenciais para a análise econômica de projetos de conversão energética de biomassa. O custo de geração de eletricidade é demasiadamente sensível ao custo ou taxa de juros referente à procedência do capital do projeto. O custo da energia oriunda da biomassa é significativamente vinculado à escala da planta. Caso os custos de capital e matéria-prima sejam reduzidos, a bioenergia pode ser uma alternativa competitiva de produção de eletricidade (IEA e FAO, 2017; IEA e NEA, 2020; IRENA, 2020e).

A implantação e funcionamento de usinas de geração de energia elétrica obtida a partir de RSU apresenta como principais custos: (IRENA, 2020e): (i) custo de planejamento, engenharia e construção; (ii) maquinário de manuseio e preparação de combustível; (iii) outros equipamentos, como motor principal e o sistema de

conversão de combustível; e (iv) custos da conexão à rede e infraestrutura. As tecnologias mais comuns para conversão energética de biogás são os motores de combustão interna e as turbinas a gás. As microturbinas a gás têm menor eficiência energética e maior custo se comparados aos motores de ciclo Otto (PERSSON et al., 2006; SANTOS et al., 2016).

Na última década, os custos sobre a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis foram reduzidos, influenciados pela melhoria de tecnologias, economia de escala e cadeias de suprimentos competitivas (IRENA, 2020e). Entretanto, há barreiras econômicas relevantes sobre a avaliação de investimentos em projetos, que são relacionadas principalmente aos custos de capital e operacionais da remoção de impurezas de biogás, em contraponto ao baixo preço do gás natural, e ao custo de entrega do biocombustível aos clientes, em caso de necessidade de investimento em interconexões e gasodutos (CANADA, 2013; USEPA, 2021a).

Políticas nacionais de incentivo à produção de biometano

Diversos autores no mundo defendem a necessidade de criação de incentivos federais e estaduais para minimizar barreiras financeiras e viabilizar projetos de produção de biogás e biometano (BARROS et al., 2014; CZYRNEK-DELÉTRE et al., 2016; MOULOD et al., 2016; ; CUCCHIELLA, 2018; RANIERI et al., 2018; RAVINA et al., 2019; CAVAIGNAC et al., 2021; DYER et al., 2021; RIBEIRO et al., 2021). Os governos podem estabelecer medidas de apoio à implantação e inovação tecnológica para o desenvolvimento da bioenergia. Essas medidas incluem políticas e estruturas regulatórias com metas ambiciosas para aquecer o mercado e assegurar a eficiência da infraestrutura necessária (IRENA, 2020b).

A Política Nacional de Biocombustíveis do Brasil (RenovaBio) permite que a demanda de biocombustíveis aumente progressivamente, configurando um instrumento para garantir a sustentabilidade e a previsibilidade sobre a matriz de transportes do país. A RenovaBio valoriza o etanol anidro e hidratado, biodiesel, biometano, bioquerosene de aviação, entre outros biocombustíveis alternativos (BRASIL, 2020a; BRASIL, 2021b).

A RenovaBio foi instituída pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e visa estabelecer a relação apropriada entre eficiência energética e redução de emissões de GEE na produção, comercialização e no uso de biocombustíveis, além de desenvolver a expansão satisfatória da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética do país (BRASIL, 2017b).

A principal meta nacional da RenovaBio é a redução de GEE na matriz energética, que é definida pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Tais metas são solucionadas por meio da compra dos créditos de descarbonização (CBIOs) (BRASIL, 2017b; BRASIL, 2020b). As metas compulsórias anuais definidas pela Resolução CNPE nº13, de 8 de dezembro de 2022, são de 37,47 milhões de CBIOs para o ano de 2023, 50,81 milhões de CBIOs para 2024 e 58,91, para 2025 (BRASIL, 2023).

Os CBIOS são uma ferramenta da RenovaBio, e são relacionados ao volume de biocombustível produzido e comercializado com a nota de eficiência energético-ambiental obtida pelo “RenovaCalcMD”, que é um instrumento para contabilizar a intensidade de carbono presente em um biocombustível (em gCO₂eq./MJ) em comparação à intensidade de um combustível fóssil equivalente, fundamentado por banco de dados e com estrutura de cálculo em planilha eletrônica (MATSUURA et al., 2018).

A avaliação de desempenho ambiental da RenovaBio para obtenção de CBIOS é baseada no cálculo de análise de ciclo de vida (ACV) atribucional, que é uma técnica descritiva ou contábil que atribui a um dado produto, em seu processo de fabricação, uma parcela das emissões totais de poluentes e do consumo de recursos econômicos (WEIDEMA et al., 2009; MATSUURA et al., 2018).

Os CBIOS são deliberados em forma escritural e em quantidade relativa ao volume de biocombustível relacionado à nota de eficiência energético-ambiental. Os primeiros créditos colocados na bolsa de valores B3 foram negociados em abril de 2020 a preços médios ponderados de R\$ 16,00. Deve-se considerar a cobrança de imposto de 15% em operação de créditos, câmbio e seguro de pessoas jurídicas, que é estabelecida pela Lei nº 13.986, de 7 de abril de 2020 (BRASIL, 2017b; BRASIL, 2020d; BRASIL, 2020e).

Em 2020, foi criado o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) RenovaBio para estimular benefícios em relação à certificação e o aumento da eficiência energético-ambiental por meio da oferta de redução da taxa de juros para empresas que alcancem metas de redução de emissão de CO₂ (BRASIL, 2021b).

O Programa Nacional de Redução de Metano de Resíduos Orgânicos (“Metano Zero”) é uma oportunidade econômica e estratégica para a redução de emissões de GEE e de custos de energia e combustível, que pode transformar aterros sanitários em fornecedores de biocombustíveis com base na cooperação para o financiamento, incentivos, desoneração, captação, desenvolvimento, transferência e difusão de tecnologias e processos necessários para a produção de biogás e biometano no país (BRASIL, 2022b). O Metano Zero pode disponibilizar linhas de crédito e financiamento para o desenvolvimento de ações e atividades voltadas para produção de biogás e biometano, como (BRASIL, 2022b): (i) implantação de biodigestores; (ii) implantação de sistema de purificação de biogás, produção e compressão de biometano; (iii) criação de pontos e corredores verdes para abastecimento de veículos pesados movidos a biometano; (iv) implantação de tecnologias que permitam a utilização de biocombustíveis em motores de combustão interna de ciclo Otto ou Diesel; (v) fomentar a utilização ou desenvolvimento de tecnologia veicular; (vi) desoneração tributária para infraestruturas relacionadas com projetos de biogás e biometano.

O programa Combustível do Futuro, instituído pela Resolução nº 7 do Ministério de Minas e Energia, de 20 de abril de 2021, visa aumentar o uso de biocombustíveis e estimular o desenvolvimento de tecnologias veiculares nacionais por meio de estratégias de integração de

políticas públicas que incentivem a produção de biocombustíveis e a redução de emissões de GEE (BRASIL, 2021c).

Conclusão

O presente estudo investigou os principais fatores relacionados à produção de biogás e biometano, via biodigestão anaeróbia da fração orgânica de RSU, presentes na literatura contemporânea.

A biodigestão anaeróbia é uma rota tecnológica que pode trazer benefícios ambientais e econômicos e para os setores de gerenciamento de resíduos e de geração de energia. A produção de biogás e biometano a partir de RSU pode favorecer o desenvolvimento da bioenergia na matriz energética sustentável e minimizar a emissão de GEE em aterros sanitários.

Entretanto, há algumas barreiras econômicas na produção de biogás e biometano a partir de RSU. O processo de purificação, necessário para retirar o conteúdo não-energético do biogás e aumentar a concentração de biometano, apresenta custo elevado e pode inviabilizar projetos. Dessa maneira, análises de viabilidade econômica são importantes ferramentas para comprovar o desempenho econômico e a lucratividade de projetos de produção de biocombustíveis a partir de RSU, que apresentam taxa mínima de atratividade variando entre 10% e 15%.

É consenso entre diversos autores na literatura que há necessidade de incentivos governamentais visando o aporte de recursos que promovam a viabilidade de projetos para produção de biogás e biometano. No Brasil, a Política Nacional dos Biocombustíveis (RenovaBio) e o Programa Nacional de Redução de Metano de Resíduos Orgânicos (Metano Zero) buscam garantir a sustentabilidade dos setores de produção de energia e de gerenciamento de resíduos sólidos e apresentam ferramentas econômicas importantes e adequadas à produção de biogás e biometano, a partir de RSU em aterros sanitários no território nacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida.

Referências

- ABAD, V.; AVILA, R.; VICENT, T.; FONT, X. Promoting circular economy in the surroundings of an organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion treatment plant: Biogas production impact and economic factors. *Bioresource Technology*, v.283(July), p.10-17, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.064>
- ABRAHAM, A.; MATHEW, A. K.; PARK, H.; CHOU, O.; SINDHU, R.; PARAMESWARAN, B.; PANDEY, A.; PARK, J. H.; SANG, B. Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, v.301(April), p.01-13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>

- AHMED, S. I.; JOHARI, A.; HASHIM, H.; LIM, J. S.; JUSOH, M.; MAT, R.; ALKALI, H. Economic and environmental evaluation of landfill gas utilisation: A multi-period optimisation approach for low carbon regions. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.102(August), p.191-201, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.008>
- ALAO, M. A.; POPOOLA, O. M.; AYODELE, T. R. Waste-to-energy nexus: an overview of technologies and implementation for sustainable development. **Cleaner Energy Systems**, v.03(December), p.01-14, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100034>
- AMINI, H. A.; REINHART, D. R. Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential. **Waste Management**, v.31, n.9-10, p.2020-2026, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.010>
- ARIUNBAATAR, J.; PANICO, A.; FRUNZO, L.; ESPOSITO, G.; LENS, P. N.; PIROZZI, F. Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods. **Journal of Environmental Management**, v.146(December), p.142-149, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.042>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABIOGÁS). **O Potencial Brasileiro do Biogás**. São Paulo, SP: ABIOGÁS, 2020. 28p. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390e394c734a95f3032a2da_NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABIOGÁS). **PNBB - Programa Nacional do Biogás e do Biometano**. São Paulo, SP: ABIOGÁS, 2022. 31p. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf. Acesso em: 13 abr. 2023
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Estimativas de custos para viabilizar a universalização da destinação de resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, SP: ABRELPE, 2015. 48p. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/mativa-dos-custos-para-viabilizar-a-universalizacao-da-destinacao-adequada-de-residuos-solidos-no-brasil/>. Acesso em: 24 abr. 2023
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2020**. São Paulo, SP: ABRELPE, 2020. 52p. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020>. Acesso em: 24 abr. 2023
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023**. São Paulo, SP: ABREMA, 2023, 54p. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/download/92323/?tmstsv=1709314789>. Acesso em: 9 mai. 2024.
- ATELGE, M. R.; SENOL, H.; DJAAFRI, M.; HANSU, T. A.; KRISA, D.; ATABANI, A.; ESKICIOGLU, C.; MURATÇOBANOĞLU, H.; UNALAN, S.; KALLOUM, S.; AZBAR, N.; KIVRAK, H. D. A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes. **Sustainability**, v.12, n.20, p.01-39, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132011515>
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Jaboatão dos Guararapes, PE: Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco (FADE – UFPE), 2014. 187 p. ISBN: 978-85-6-917-36-5. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_residuos_solidos_Relat_Final.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, T. R. da. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v.65(February), p.150-164, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>
- BEYENE, H. D.; WERKNEH, A. A.; AMBAYE, T. G. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. **Renewable Energy Focus**, v.24(March), p.01-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.11.001>
- BOGNER, J.; AHMED, M. A.; DIAZ, C.; FAALJ, A.; GAO, Q.; HASHIMOTO, S.; MARECKOVA, K.; PIPATTI, R.; ZHANG, T. **Waste Management, In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)] Cambridge (UK)/ Nova Iorque (USA): Cambridge University Press, 2007. 34p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg3-chapter10-1.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- BOGNER, J.; PIPATTI, R.; HASHIMOTO, S.; DIAZ, C.; MARECKOVA, K.; DIAZ, L.; KJELDSEN, P.; MONNI, S.; FAALJ, A.; QINGXIAN, G.; TIANZHU, Z.; MOHAMMED, A. A.; SUTAMIHARDJA, R. T. M.; GREGORY, R. Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the intergovernmental panel on climate change (IPCC) fourth assessment report. Working group III (Mitigation). **Waste Management & Research**, v.26, n.01, p.11-32, 2008. <https://doi.org/10.1177/0734242X07088433>
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA). **Capacidade Instalada por Estado. Data de referência dos dados: 13 de abril de 2023**. 2022a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjIlILWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTYtY2NDZmI05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução nº 685, de 29 de junho de 2017. Estabelece as regras para aprovação do controle de qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2017a. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19149639/do1-2017-06-30-resolucao-n-685-de-29-de-junho-de-2017-19149544. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1988; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/575947>. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2017b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Lei nº 13.986, de 7 d abril de 2020. Institui o Fundo Garantidor Solidário (FGS); dispõe sobre o patrimônio rural em afetação, a Cédula Imobiliária Rural (CIR), a escrituração de títulos de crédito e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2020e. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/Lei/L13986.htm. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Análise de conjuntura dos biocombustíveis: ano 2020**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2021b, 87p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_ano_2020.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico de energia elétrica 2020: ano base 2019**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2020d. 256 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202020.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2020: ano base 2019**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2020b. 264p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2021: ano base 2020**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2021a. 302p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília, DF: Ministério de Minas/ Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2020a. 243p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica – precificação do carbono: riscos e oportunidades para o Brasil. 2020**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2020c. 73p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-549/NT%20EPE-DEA-GAB-014-2020%20-%20Precifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20C_final_05012021.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica DEA 18/14: inventário energético dos resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética, 2014a. 50p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica EPE 01/2018: estudo sobre a economicidade do aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos em aterro para produção de biometano**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2018b. 20p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-309/NT%20Biometano%20de%20Aterro%20vP%200192018.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica PR04/18 – potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2018a. 184p. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/03.%20Potencial%20de%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20no%20Horizonte%202050%20\(NT%20PR%2004-18\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/03.%20Potencial%20de%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20no%20Horizonte%202050%20(NT%20PR%2004-18).pdf). Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução n° 7, de 20 de abril de 2020. Institui o Programa Combustível do Futuro, cria o Comitê Técnico Combustível do Futuro e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2021c. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-320067170>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia/ Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Despacho ANP n° 84, de 12 de dezembro de 2022. Resolução n° 13, de 8 de dezembro de 2022, do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Define as metas compulsórias anuais da redução das emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/ResCNPE132022.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Nacional Metano Zero. Brasília, DF, 2022b. 10p. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/MinutaProgramaMetanoZero.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. 1ª ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 83p. ISBN: 978-85-7958-039-0. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-tecnologias-biogas.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de RSU com produção de biogás**. 1ª ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. 124p. ISBN 978-85-7958-060-4. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/Viabilidade_RSU.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- BRITO, R. C.; BARROS, R. M.; SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, S. P. G. Municipal solid waste management and economic feasibility for electricity generation from landfill gas and anaerobic reactors in a Brazilian state. **Environmental Technology & Innovation**, v.22(May), p.01-20, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101453>
- BRUCKNER, T. BASHMAKOV, I. A.; MULUGETTA, Y.; CHUM, H.; NAVARRO, A. de la V.; EDMONDS, J.; FAAIJ, A.; FUNGTAMMASAN, B.; GARG, A.; HERTWICH, E.; HONNERY, D.; INFELD, D.; KAINUMA, M.; KHENNAS, S.; KIM, S.; NIMIR, H. B.; RIAHI, K.; STRACHAN, N.; WISER, R.; ZHANG X. **2014: Energy Systems. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge (UK)/ Nova Iorque (USA): Cambridge University Press, 2014. 88p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter7.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- CANADA, Ministry of the Environment. **Technical document on municipal solid waste organics processing**. Gatineau, QC: Public Works and Government Services of Canada (PWGSC), 2013. 208p. ISBN: 978-1-100-21707-9. Disponível em: https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/main/gdd-mw/3e8cf6c7-f214-4ba2-a1a3-163978ee9d6e/13-047-id-458-pdf_accessible_ang_r2-reduced-20size.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- CASTRO, R.; LYRA FILHO, C. Um método de suporte a decisões sobre investimento e comercialização de energia elétrica no Brasil. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 16, n.4, p.478-494, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ca/a/vHTZBwr49smkdXDtpdNSZq/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- CAVAIGNAC, R. S.; FERREIRA, N. L.; GUARDANI, R. Techno-economic and environmental process evaluation of biogas upgrading via amine scrubbing. **Renewable Energy**, v.171(June), p.868-880, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.097>
- CHEN, P.; XIE, Q.; ADDY, M.; ZHOU, W.; LIU, Y.; WANG, Y.; CHENG, Y.; LI, K.; RUAN, R. Utilization of municipal solid and liquid wastes for bioenergy and bioproducts production. **Bioresource Technology**, v.215(September), p.163-172, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.094>

- CHENG, H.; HU, Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: current and future practices in China. **Bioresource Technology**, v.101, n.11, June, p.3816-3824, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.040>
- CHRISTENSEN, T. H.; BJERG, P. L.; JENSEN, D. L.; CHRISTENSEN, J. B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H.; HERON, G. Biochemistry of landfill leachate plumes. **Applied Geochemistry**, v.16, n.07-08, p.659-718, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)
- CHUAH, C. Y.; GOH, K.; YANG, Y.; GONG, H.; LI, W.; KARAHAN, H. E.; GUIVER, M. D.; WANG, R.; BAE, T.; Harnessing filler materials for enhancing biogas separation membranes. **Chemical Reviews**, v.18, n.118, p.8655-8769, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00091>
- CLIMATE TECHNOLOGY CENTER & NETWORK (CTCN). **Climate changes strategies 2020**. Copenhagen, Dinamarca: CTCN, 2019. 84p. ISBN: 978-1-9998451-4-8. Disponível em: https://www.ctcn.org/sites/www.ctcn.org/files/climate_change_strategies_2020_final_with_links_1.pdf. Acesso em: 23 abr. 2023
- CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M.; MILIACCA, M. A profitability analysis of small-scale plants for biomethane injection into the gas grid. **Journal of Cleaner Production**, v.184(May), p.179-187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.243>
- CZYRNEK-DELÈTRE, M. M.; AHERN, E. P.; MURPHY, J. D. Is small-scale upgrading of landfill gas to biomethane for use as a cellulosic transport biofuel economically viable?. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v.10(January), p.139-149, 2016. <https://doi.org/10.1002/bbb.1627>
- DEDINEC, N.; MARKOVSKA, N.; RITOVSKI, I.; VELESKI, G.; GJORGJIEVSKA, V. T.; GRNCAROVSKA, T. O.; ZDRAVEVA, P. Economic and environmental evaluation of climate change mitigation measures in the waste sector of developing countries. **Journal of Cleaner Production**, v.88(February), p.234-241, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.048>
- DYER, A.; MILLER, A. C.; CHANDRA, B.; MAZA, J. G.; TRAN, C.; BATES, J.; OLIVIER, V.; TUININGA, A. R. The Feasibility of Renewable Natural Gas in New Jersey. **Sustainability**, v.13(February), p.1618, p.01-31, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13041618>
- EL IBRAHIMI, M.; KHAYM I.; EL MAAKOUL, A.; BAKHOUYA, M. Techno-economic and environmental assessment of anaerobic co-digestion plants under different energy scenarios: A case study in Morocco. **Energy Conversion and Management**, v.245(October), p.01-18, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114553>
- ELSBACH, K. D.; VAN KNIPPENBERG, D. Creating high-impact literature reviews: an argument for 'integrative reviews'. **Journal of Management Studies**, v.57, n.06, p.1277-1289, 2020. <https://doi.org/10.1111/joms.12581>
- EUROPEAN COMMISSION (EC). **Guide to cost-benefit analysis of investment projects: economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020**. Bruxélas, Bélgica: European Commission, Directorate-General for Regional and Urban policy, 2014. 347p. ISBN: 978-92-79-34796-2. Disponível em: <https://poseur.portugal2020.pt/media/40474/guide-to-cost-benefit-analysis-of-investment-projects.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- EUROPEAN COMMISSION (EC). **Optimal use of biogas from waste stream: an assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020**. Directorate-General for Energy, EC, March, 2017. 158p. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ce_delft_3g84_bio_gas_beyond_2020_final_report.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR). **Guia prático de Biogás. Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás (PROBIOGÁS)**. 5ª ed. Gülzow, DE: FNR, 2010. 234p. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf>. Acesso em: 9 mai. 2024
- FOSTER, O.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M. VAN DORLAND, R.; MILLER H. L. (2007). **Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing Chapter 2**. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. ISBN: 9780521705967. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- GEBREZGABHER, A.; MEUWISSEN, M. P. M.; PRINS, B. A. M.; LANSINK, A. G. J. M. O. Economic analysis of anaerobic digestion - a case of green power biogas plant in the Netherlands. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v.57, n.02, p.109-115, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2009.07.006>
- GONÇALVES, E. Percepção de risco no setor elétrico brasileiro. **Conjuntura Econômica**, v.69, n.05, p.54-56, 2015. Disponível em: http://docvirt.com/docreader.net/docreader.aspx?bib=Conjun_D10&Pasta=&Pesq=2015&pagfis=5827. Acesso em: 23 abr. 2023
- HAN, J.; LIANG, Y.; HU, J. QIN, L.; STREET, J.; LU, Y.; YU, F. Modeling downdraft biomass gasification process by restricting chemical reaction equilibrium with Aspen Plus. **Energy Conversion and Management**, v.153(December), p.641-648, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.030>
- HASAN, M. M.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; ASHWAT, N.; JAHIRUL, M. I. Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.145(July), p.01-19, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111073>
- HASSAN, S. S.; WILLIAMS, G. A.; JAISWL, A. K. Moving towards the second generation of lignocellulosic biorefineries in the EU: drivers, challenges, and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.101(March), p.590-599, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.041>
- HENZE, M.; HARREMOËS, P. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors – a literature review. **Water Science & Technology**, v.15, n.08-09, p.1-101, 1983. <https://doi.org/10.2166/wst.1983.0161>
- HILAIRE, F.; BASSET, E.; BAYARD, R.; GALLARDO, M.; THIEBAUT, D.; VIAL, J. Comprehensive two-dimensional gas chromatography for biogas and biomethane analysis. **Journal of Chromatography**, v.1524(November), p.222-232, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.09.071>
- HÖGLUND-ISAKSSON, L.; GÓMEZ-SANABRIA, A.; KLIMONT, Z.; RAFAJ, P.; SCHÖPP, W. Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe –results from the GAINS model. **Environmental Research Communications**, v.02(February), p.02-21, 2020. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab7457>
- INANC, B.; INOUE, Y.; YAMADA, M.; ONO, Y.; NAGAMORI, M. Heavy metal leaching from aerobic and anaerobic landfill bioreactors of co-disposed municipal solid waste incineration bottom ash and shredded low-organic residues. **Journal of Hazardous Materials**, v.141, n.03, p.793-802, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.042>
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **How2Guide for Bioenergy Roadmap Development and Implementation**. 2017. 78p. ISBN 978-92-5-109586-7. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i6683e/i6683e.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA). **Projected costs of generating electricity: 2020 edition**. Paris, France/ Boulogne-Billancourt, France: IEA/NEA, December, 2020. 223p. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023

- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Circular Carbon Economy Report 02 – Reduce: Non-bio renewables**. Abu Dhabi: IRENA, 2020d. 73p. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Reduce-Non-bio-renewables>. Acesso em: 23 abr. 2023
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Circular Carbon Economy report 05 - recycle: bioenergy**. Abu Dhabi: King Abdullah Petroleum Studies and Research Centre (KAPSARC)/IRENA, 2020b. 76p. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Recycle-Bioenergy>. Acesso em: 24 abr. 2023
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Global Renewables outlook: energy transformation 2050**. Abu Dhabi: IRENA, 2020a. 291p. ISBN: 978-92-9260-238-3. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>. Acesso em: 24 abr. 2023
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Reaching zero with renewables: eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5°C climate goal**. Abu Dhabi: IRENA, 2020c. 216p. ISBN 978 - 92 - 9260 - 269 - 7. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Reaching-Zero-with-Renewables>. Acesso em: 24 abr. 2023
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Power Generation Costs in 2019**. Abu Dhabi: IRENA, 2020e, 144p. ISBN 978-92-9260-244-4. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>. Acesso em: 24 abr. 2023
- JAGTAP, N. J.; DALVI, V. H. Feasibility study of bio-methane economy in India. **Biomass and Bioenergy**, v.149(June), p. 01-12, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106059>
- KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. Waste to energy status in India: A short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31(March), p.113-120, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.020>
- KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; WOERDEN, F. V. 2018. **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018. 295p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/30317>. Acesso: 24 abr. 2023
- KHANAL, S. K. 2008. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications**. Ames, Yowa: John Wiley & Sons, 2008. 308p. ISBN-13:978-0-8138-2346-1/2008. Disponível em: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/130281/mod_resource/content/2/A_naerobic-Biotechnology-for-Bioenergy-Production.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- KORMI, T.; ALI, N. B. H.; GREEN, T. A. R. Estimation of landfill methane emissions using stochastic search methods. **Atmospheric Pollution Research**, v.08, n.04, p.597-605, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.12.020>
- KORMI, T.; MHADHEBI, S.; ALI, N. B. H.; ABICHO, T.; GREEN, R. Estimation of fugitive landfill methane emissions using surface emission monitoring and genetic algorithms optimization. **Waste Management**, v.72(February), p.313-328, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.024>
- KRISTANTO, G. A.; KOVEN, W. Estimating greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Depok, Indonesia. **City and Environment Interactions**, v.04(December), 100027, p.1-8, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100027>
- LEE, D.; LU, J.; CHANG, J. Pyrolysis synergy of municipal solid waste (MSW): A review. **Bioresource Technology**, v.318(December), p.01-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123912>
- LEE, U.; HAN, J.; WANG, M. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. **Journal of Cleaner Production**, v.166(November), p.335-342, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016>
- LEE, U.; HAN, J.; WANG, M. **Well-to-wheels analysis of compressed natural gas and ethanol from municipal solid waste**. Chicago, EUA: United States Department of Energy/ Argonne National Laboratory, October, 2016, 40p. <https://doi.org/10.2172/1334188>
- LIU, N.; JIANG, J.; YAN, F.; GAO, Y.; MENG, Y.; AIHEMAITI, A.; JU, T. Enhancement of volatile fatty acid production and biogas yield from food waste following sonication pretreatment. **Journal of Environmental Management**, v.217(July), p.797-804, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.135>
- LIU, X.; GAO, X.; WANG, W.; ZHENG, L.; ZHOU, Y.; SUN, Y. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: focusing on biogas production and GHG reduction. **Renewable Energy**, v.44(August), p.463-468, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.092>
- LIU, Y.; LIAO, C.; TANG, Y.; TANG, J.; SUN, Y.; MA, X. Techno-environmental-economic evaluation of the small-scale municipal solid waste (MSW) gasification-based and incineration-based power generation plants. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v.141(December), p.01-08, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104594>
- LUZ, F. C.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; ANDRADE, R. V.; LEME, M. M. V.; OLMO, O. A. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v.103(October), p.321-337, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>
- MALKOW, T. Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal. **Waste Management**, v.24, n.02, p.53-79, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00038-2)
- MANASAKI, V.; PALOGOS, I.; CHOURDAKIS, I.; TSAFANTAKIS, K.; GIKAS, P. Techno-economic assessment of landfill gas (LFG) to electric energy: selection of the optimal technology through field-study and model simulation. **Chemosphere**, v.269 (April), p.01-11, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128688>
- MANFREDI, S.; TONINI, D.; CHRISTENSEN, T. H. Contribution of individual waste fractions to the environmental impacts from landfilling of municipal solid waste. **Waste Management**, v.30, n.03, p.433-440, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.017>
- MARTÍN-PASCUAL, J.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, J. M.; ECCOMARINI, N.; ORDOÑEZ, J.; ZAMORANO, M. The study of economic and environmental viability of the treatment of organic fraction of municipal solid waste using Monte Carlo simulation. **Applied Sciences**, v.10(December), 9028, p.01-12, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/app10249028>
- MASEBINU, S. O.; AKINLABI, E. T.; MUZENDA, E.; ABOYADE, A. O.; MBOHWA, C. Experimental and feasibility of biogas production by anaerobic digestion of fruit and vegetable waste from Joburg Market. **Waste Management**, v.75(May), p.236-250, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.011>
- MATSUURA, M. I. S. F.; SCACHETTI, M. T.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A. MOREIRA, M. M. R.; BONOMI, A. M.; BAYMA, G. PICOLI, J. F.; MORANDI, M. A. B.; RAMOS, N. P. CAVALETT, O.; NOVAES, R. M. L. **Nota Técnica. RenovaCalc^{MD}: Método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no programa RenovaBio**. Brasília, DF: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2018. 50p. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-e-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cp10-2018_notatecnica-renova-calc.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- MCKAY, G. Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review. **Chemical Engineering Journal**, v.86, n.03, p.323-368, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(01\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00228-5)

- MESCIA, D.; HERNÁNDEZ, S. P.; CONOCI, A.; RUSSO, N. MSW landfill biogas desulfurization. *International Journal of Hydrogen Energy*, v.36, n.13, p.7884-7890, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.057>
- MOULOD, M.; JALALI, A.; ASMATULU, R. Biogas derived from municipal solid waste to generate electrical power through solid oxide fuel cells. *International Journal of Energy Research*, v.40, n.15, p.2091-2104, 2016. <https://doi.org/10.1002/er.3585>
- MURPHY, J. D.; MCKEOGH, E. Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. *Renewable Energy*, v.29, n.07, p.1043-1057, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.12.002>
- NAG, M.; SHIMAOKA, T.; NAKAYAMA, H.; KOMIYA, T.; XIAOLI, C. Field study of nitrous oxide production with in situ aeration in a closed landfill site. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v.66, n.03, p.280-287, 2016. <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1130664>
- PADILHA, J. L.; MESQUITA, A. L. A. Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil. *Energy Conversion and Management*, v.265(August), 115743, p.01-14, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115743>
- PAES, M. X.; MEDEIROS, G. A.; MANCINI, S. D.; GASOL, C.; PONS, J. R.; DURANY, X. G. Transition towards eco-efficiency in municipal solid waste management to reduce GHG emissions: the case of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 263(August), p.01-13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121370>
- PARANÁ. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PERS): relatório 15 – produto 15 – relatório final do plano de ação**. Curitiba, PR: EnVex/ Engebio, 2018. 321p. Disponível em: https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2019-10/plano_estadual_de_residuos_solidos.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- PARIATAMBY, A.; CHEAH, W. Y.; SHRIZAL, R.; THAMLARSON, N.; LIM, B. T.; BARASARATHI, J. Enhancement of landfill methane oxidation using different types of organic wastes. *Environmental Earth Sciences*, v.73, n.05, p.2489-2496, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3600-3>
- PARKER, N.; WILLIAMS, R.; DOMINGUEZ-FAUS, R.; SCHEITRUM, D. Renewable natural gas in California: An assessment of the technical and economic potential. *Energy Policy*, v.111(December), p.235-245, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.034>
- PERSSON, M.; JÖNSSON, O.; WELLINGER, A. **Biogas upgrading for vehicle fuel standards and grid injection**. Viena, Austria: IEA Bioenergy, Task 37, December, 2006. 36p. Disponível em: http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_report_final.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- PETERSSON, A.; WELLINGER, A. **Biogas upgrading technologies: developments and innovations**. IEA Bioenergy, Task 37, October, 2009. 20p. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2009/10/upgrading_rz_low_final.pdf. Acesso em: 23 abr. 2023
- PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; ROALCABA, O. D. C. Technical assessment of mono-digestion and co-digestion systems for the production of biogas from anaerobic digestion in Brazil. *Renewable Energy*, v.117(March), p.447-458, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.085>
- PIVATO, A.; GASPARI, L. Acute toxicity test of leachates from traditional and sustainable landfills using luminescent bacteria. *Waste Management*, v.26, n.10, p.1148-1155, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.10.008>
- PRANIGRAHI, S.; DUBEY, B. K. A critical review on operation parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*, v.143(December), p.779-797, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.040>
- RADA, E. C. **Energy from municipal solid waste**. In *ENERGY QUEST 2014*. Southampton, UK: WIT Press, 2014. <http://dx.doi.org/10.2495/eq140892>
- RAHMAN, W.; PATEL, M.; KURIAN, V.; KUMAR, A. A comparative techno-economic assessment of fast pyrolysis, hydrothermal liquefaction, and intermediate pyrolysis of municipal solid waste for liquid transportation fuels production. *Energy Conversion and Management*, v.267(September), p.01-15, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115877>
- RAJENDRAN, K.; BROWNE, J.; MURPHY, D. What is the level of incentivisation required for biomethane upgrading technologies with carbon capture and reuse?. *Renewable Energy*, v.133(April), p.951-963, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.091>
- RAJENDRAN, K.; KANKANALA, H. R.; MARTINSSON, R.; TAHERZADEH, M. J. Uncertainty over techno-economic potentials of biogas from municipal solid waste (MSW): A case study on an industrial process. *Applied Energy*, v.125(July), p.84-92, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.041>
- RANIERI, L.; MOSSA, G.; PELLEGRINO, R.; DIGIESI, S. Energy Recovery from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste: A Real Options-Based Facility Assessment. *Sustainability*, v.10(January), 368, p.01-15, 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/su10020368>
- RAVINA, M.; CASTELLANA, C.; PANEPINTO, D.; ZANETTI, M. C. MCBioCH4: a computational model for biogas and biomethane evaluation. *Journal of Cleaner Production*, v.227(August), p.739-747, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.224>
- RIBEIRO, N. S.; BARROS, R. M.; SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, S. P. G. Electric energy generation from biogas derived from municipal solid waste using two systems: landfills and anaerobic digesters in the states of São Paulo and Minas Gerais, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v.48(December), p.01-21, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101552>
- RODRIGUES, L. F.; SANTOS, I. F. S.; SANTOS, T. I. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Energy and economic evaluation of MSW incineration and gasification in Brazil. *Renewable Energy*, v.188(April), p.933-944, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.083>
- SAJID, M.; RAHEEM, A.; ULLAH, N.; ASIM, M.; REHMAN, M. S. U.; ALI, N. Gasification of municipal solid waste: Progress, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.168(October), p.01-23, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112815>
- SALOMONI, C.; CAPUTO, A.; BONOLI, M.; FRANCIOSO, O.; RODRIGUEZ-ESTRADA, M. T.; PALENZONA, D. Enhanced methane production in a two-phase anaerobic digestion plant, after CO2 capture and addition to organic wastes. *Bioresource Technology*, v.102, n.11, p.6443-6448, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.079>
- SANTOS, I. F. S. dos; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, v.126(July), p.504-514, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.072>
- SANTOS, I. F. S.; GONÇALVES, A. T. T.; BORGES, P. B.; BARROS, R. M.; LIMA, R. S. Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, v.136(September), p. 376-388, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.011>
- SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; NÓBREGA, L. G. B.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling*, v.131(April), p.54-63, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>

- SANTOS, R. E.; SANTOS, I. F. S. dos; BARROS, R. M.; BERNAL, A. P.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, F. G. B. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: an economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v.231(February), p.198-206, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>
- SAWATDEENARUNAT, C.; SURENDRA, K. C.; TAKARA, D.; OECHSNER, H.; KHANAL, S. K. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v.178(February), p.178-186, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.103>
- SCAGLIA, B.; CONFALONIERI, R.; D'IMPORZANO, G.; ADANI, F. Estimating biogas production of biologically treated municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v.101, n.03, p.945-952, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.085>
- SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v.129(December), Part-A, p.457-472, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- SCHEUTZ, C.; PEDICONE, A.; PEDERSEN, G. B.; KJELDSEN, P. Evaluation of respiration in compost landfill biocovers intended for methane oxidation. **Waste Management**, v.31, n.05, p.895-902, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.019>
- SCHIRMER, W. N.; GAUER, M. A.; TOMAZ, E.; RODRIGUES, P. R. P.; SOUZA, S. N. M.; CHAVES, L. L.; VILLETI, L. OLANYK, L. Z.; CABRAL, A. R. Power generation and gaseous emissions performance of an internal combustion engine fed with blends of soybean and beef tallow biodiesel. **Environmental Technology**, v.37(December), p.1-10, 2015. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1119202>
- SILVA, L. J. V. B.; SANTOS, I. F. S.; MENSAH, H. R.; GONÇALVES, A. T. T.; BARROS, R. M. Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. **Renewable Energy**, v.149(April), p.1386-1394, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.134>
- SILVA, S. T. S.; BARROS, R. M.; SANTOS, I. F. S.; CRISPIM, A. M. C.; TIAGO FILHO, G. L.; LORA, E. E. S. Technical and economic evaluation of using biomethane from sanitary landfills for supplying vehicles in the Southeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v.196(August), p.1142-1157, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.020>
- SILVA, T. R.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SANTOS, I. F. S. Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill. **Waste Management**, v.65(July), p.75-91, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.018>
- SIPRA, A. T.; GAO, N.; SARWAR, H. Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts. **Fuel Processing Technology**, v. 175(June), p.131-147, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.012>
- SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO (SEEG). **Gases de efeito estufa 2020 e suas implicações para as metas de clima do Brasil (1970-2019)**. Observatório do Clima/IPAM/IMAFLORA/IEMA/ICLEI, Novembro, 2020, 41p. Disponível em: https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2020/11/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- STERN, N. Current climate models are grossly misleading. **Nature**, v.530(February), p.407-409, 2016. <https://doi.org/10.1038/530407a>
- TAN, S. T.; HO, W. S.; HASLENDIA, H.; LEE, C. T.; TAIB, M. R.; HO, C. S. Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. **Energy Conversion and Management**, v.102(September), p. 111-120, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>
- THANH, N. P.; MATSUI, Y.; FUJIWARA, T. Household solid waste Generation and characteristic in Mekong Delta city, Vietnam. **Journal of Environmental Management**, v.91, n.11, p.2307-2321. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.06.016>
- TIPPAYAWONG, N.; THANOMPONGCHART, P. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. **Energy**, v.35, n.12, p.4531-4535, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.014>
- TORRACO, R. J. Writing integrative literature reviews: guidelines and examples. **Human Resource Development Review**, v.04, n.03, p.356-367, 2005. <https://doi.org/10.1177/1534484305278283>
- UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME (UNEP). **Division of Technology, Industry and Economics. Waste and climate changes: global trends and strategy framework**. Osaka/Shiga: International Environmental Technology Centre, 2010. 79p. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8648>. Acesso em: 24 abr. 2023
- UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME (UNEP). **Global Waste Management Outlook: Beyond an age of waste - Turning rubbish into a resource**. Nairóbi, Quênia: International Solid Waste Association (ISWA), 2024, 116p. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **An overview of renewable natural gas from biogas**. Washington, DC: USEPA, January, 2021a, 56p. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2021-02/documents/lmop_rng_document.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from municipal solid waste landfills**. North Carolina (USA): USEPA, June, 2011. 20p. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/landfills.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Landfill gas energy utilization experience: discussion of technical and non-technical issues, solutions, and trends. Technical report data n° EPA-600/R-95-035**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1995. 295p. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exec/zyPDF.cgi/91007MEF.PDF?Dockey=91007MEF.PDF>. Acesso em: 24 abr. 2023
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **LFG energy project development handbook**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2021b. 143p. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/pdh_full.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Part II: Environmental Protection Agency - 40 CFR Parts 86, 87, 89 et al. Mandatory Reporting of Greenhouse Gases; Final Rule. **Federal Register**, v.74, n.209, p.56260-56519, 2009. Disponível em: <https://www.federalregister.gov/d/E9-23315>. Acesso em: 24 abr. 2023
- VAN TIENEN, Y. M. S.; LIMA, G. M.; MAZUR, D. L.; MARTINS, K. G.; STROPARO, E. C.; SCHIRMER, W. N. Methane oxidation biosystem in landfill fugitive emissions using conventional cover soil and compost as alternative substrate—a field study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v.23(August), p.2627-2637, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02179-9>
- VAVERKOVÁ, M. D. Landfill impacts on the environment. **Geosciences**, v.09, n.431, p.1-16, 2019. <https://doi.org/10.3390/geosciences9100431>
- WEIDEMA, B. P.; EKVALL, T.; HEIJUNGS, R. **Guidelines for applications of deepened and broadened LCA**. Co-ordination Action for Innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability, Project n.037075, July, 2009. 49p. Disponível em: https://web.universiteitleiden.nl/cml/ssp/publications/calcas_report_d18.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023
- WINQUIST, E.; RIKKONEN, P.; PYYSIÄINEN, J.; VARHO, V. Is biogas an energy or a sustainability product? – Business opportunities in the Finnish biogas branch. **Journal of Cleaner Production**, v.233(October), p.1344-1354, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.181>

WORLD BIOGAS ASSOCIATION (WBA). **Global potential of biogas**. Londres, UK: WBA, June, 2019, 56 p. Disponível em: https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/09/WBA-globalreport-56ppa4_digital-Sept-2019.pdf. Acesso em: 24 abr. 2023

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). Climatewatch. **Historical GHG emissions - Global emissions**. 2022. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 21 jun. 2022.

WUEBBLES, D. J.; EASTERLING, D. R.; HAYHOE, K.; KNUTSON, T.; KOPP, R. E.; KOSSIN, J. P.; KUNKEL, K. E.; LEGRANDE, A. N.; MEARS, C.; SWEET, W. V.; TAYLOR, P. C.; VOSE, R. S.; WEHNER, M. F. 2017: Our globally changing climate. **Climate Science Special Report**, v.01, p.35-72, 2017. <https://doi.org/10.7930/J08S4N35>

YANG, N.; DAMGAARD, A.; LÜ, F.; SHAO, L. M.; BROGAARD, L. K. S.; HE, P. J. Environmental impact assessment on the construction and operation of municipal solid waste sanitary landfills in developing countries: China case study. **Waste Management**, v.34, n.05, p.929-937, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.017>

YANG, N.; ZHANG, H.; SHAO, L.; LU, F.; HE, P. Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: influence of waste characteristics and LFG treatment measures. **Journal of Environmental Management**, v.129(November), p.510-521, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.039>

YANG, Y.; WANG, J.; CHONG, K.; BRIDGWATER, A. V. A techno-economic analysis of energy recovery from organic fraction of municipal solid waste (MSW) by an integrated intermediate pyrolysis and combined heat and power (CHP) plant. **Energy Conversion and Management**, v.174(October), p.406-416, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.033>

YI, S.; JANG, Y.; AN, A. K. Potential for energy recovery and greenhouse gas reduction through waste-to-energy Technologies. **Journal of Cleaner Production**, v.176, March, p.503-511, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.103>

PEREIRA, Suellen Silva; CURI, Rosires Catão. Meio ambiente, impacto ambiental e desenvolvimento sustentável: conceituações teóricas sobre o despertar da consciência ambiental. Reunir **Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 2, n. 4, p. 35-57, 2012.

TITTARELLI, Francesca et al. Efeito do uso de EPS reciclado ao invés de virgem em argamassas leves. **Engenharia da Procedia**, v. 161, p. 660-665, 2016.

ZHANG, Jian; CHEN, Bing; YU, Fu. Preparação de argamassa de isolamento térmico à base de EPS com propriedades térmicas e mecânicas melhoradas. **Revista de Materiais em Engenharia Civil**, v. 31, n. 9, pág. 04019183, 2019.

ZHANG, Liwen et al. A novel hydrophilic modification method of EPS particles: Conception design and performances in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 142, p. 105199, 2023.