



Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biogás

Biofuels: a review of the historical background, production, and applications of biogas

Victória Huch Duarte¹, Marlon Valentini², Gabriel Borges dos Santos³, Willian Cezar Nadaletti⁴, Bruno Muller Vieira⁵.

1. Universidade Federal de Pelotas - PR , e-mail: victoriahduarte@gmail.com, 2. Universidade Federal de Pelotas – PR, e-mail: marlon.valentini@hotmail.com, 3. Universidade Federal de Pelotas - PR , e-mail: gabrielwxsantos@hotmail.com, 4. Universidade Federal de Pelotas - PR , e-mail: williancezarnadaletti@gmail.com, 5, Universidade Federal de Pelotas – PR, e-mail: bruno.prppg@hotmail.com

Resumo - A dependência global em relação aos combustíveis fósseis como fonte de energia vem gerando preocupações diante dos elevados índices de poluição ambiental e sua característica não renovável. Fontes alternativas renováveis e promissoras de energia, como o biogás, têm sido amplamente estudadas e discutidas na busca de um futuro mais sustentável. Este trabalho revisa as perspectivas de produção dos biocombustíveis, com foco especial no biogás. O trabalho busca definições que esclareçam sobre os processos de produção de biogás, esclarecendo quais as matérias-primas podem ser utilizadas, bem como sua composição e utilizações no mercado. Conforme apresentado, o biogás apresenta-se como uma alternativa viável de energia renovável e sustentável para a crescente demanda mundial por energia, encontrando-se em constante expansão de produção. Ainda, salienta-se que a aplicação de tecnologias para purificação do biogás permite a utilização deste biocombustível como fonte energética de excelente qualidade oportunizando a redução do consumo de gás natural, minimizando a dependência dos combustíveis fósseis, contribuindo para o balanço energético global e reduzindo significativamente as emissões dos gases de efeito estufa.

Palavras-chave: Bioenergia. Metano. Resíduos.

Abstract - The global dependence on fossil fuels as an energy source has been raising concerns in the face of high levels of environmental pollution and its non-renewable characteristic. Renewable and promising alternative sources of energy, such as biogas, have been widely studied and discussed in the search for a more sustainable future. This paper reviews the prospects for biofuel production, with a special focus on biogas. The present study seeks definitions that clarify the processes of biogas production, clarifying which raw materials can be used, as well as their composition and uses in the market. As presented, biogas presents itself as a viable alternative of renewable and sustainable energy for the growing world demand for energy, finding itself in constant expansion of production. Still, it's emphasizes that the application of technologies for the purification of biogas allows the use of this biofuel as an energy source of excellent quality, providing the opportunity to reduce the consumption of natural gas, minimizing dependence on fossil



fuels, contributing to the global energy balance and significantly reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: Bioenergy. Methane. Waste.

Introdução

Por séculos a humanidade vem experimentando variadas fontes de energia para consumo, como a madeira, carvão mineral, petróleo e até mesmo a energia nuclear (BHUTTO et al., 2011). Atualmente, os combustíveis fósseis, não renováveis e não sustentáveis, são de extrema relevância no desenvolvimento de diversos setores econômicos, incluindo a indústria manufatureira, o turismo, os transportes e a agricultura (JEBLI & YOUSSEF, 2017). Entretanto, o crescente aumento dos níveis de poluição ambiental gerado pelas emissões de gases do efeito estufa (GEE) vem causando uma séria preocupação em relação ao aquecimento global por parte das populações. Não obstante, o uso cada vez maior de fontes não renováveis, impulsionado pela demanda da população, traz à tona a possibilidade do esgotamento dos combustíveis fósseis (KIWJAROUN et al. 2009).

Neste contexto, surgem os biocombustíveis como uma opção promissora para a produção de energia sustentável (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018), sendo que a produção de biocombustíveis ocorre a partir de fontes renováveis, como a biomassa (CHENG & TIMILSINA, 2011).

A produção do biogás, por exemplo, figura dentre as tecnologias alternativas de geração de energia, sendo que esse biocombustível é considerado um recurso energético que além de gerar eletricidade, calor e energia, também proporciona uma contribuição ecológica (GIWA et al. 2020). O biogás é uma fonte de energia ambientalmente vantajosa capaz de gerar energia limpa através da decomposição de substratos orgânicos que emitiriam compostos tóxicos, como o metano, prejudiciais ao meio ambiente (CBIE, 2020).

Segundo Mishra et al. (2021), a transformação de resíduos em energia, além de proporcionar uma contribuição ambiental com a utilização de resíduos, também representa uma redução da dependência por combustíveis fósseis. A utilização de resíduos urbanos, por exemplo, é capaz de gerar energia, resguardar o meio ambiente de grandes quantidades de lixo orgânico e reduzir os impactos ambientais das emissões de GEE (RIBEIRO et al., 2021).

Dados divulgados pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) em novembro de 2020, demonstram que a disponibilidade de biogás no Brasil está crescendo a uma média de 40% ao ano desde 2010 (ABIOGÁS, 2020), totalizando em 2019 aproximadamente 269 mil toneladas equivalentes de petróleo (tep), contra 204 mil tep no ano anterior (BEN, 2020). Atualmente, o Brasil conta com 638 usinas de biogás em operação que destinam seu uso para a produção de energia térmica, elétrica, mecânica e produção de biometano/GNV. Os substratos utilizados para biodigestão provem principalmente de fontes industriais, agropecuárias, de resíduos sólidos urbanos ou efluentes de estações de tratamento de esgoto (CIBIOGÁS, 2021).



O contexto atual do biogás retrata um mercado em expansão, mas desprovido de pesquisas e desenvolvimento. Sendo assim, estudos como este, que colaboram para um maior conhecimento na área de energias limpas, se torna de grande importância. Com isso, o objetivo desse estudo é reunir informações provenientes de outras pesquisas ligadas às áreas de bioenergia, com foco no biogás, de forma a contribuir com a pesquisa nessa área através da elaboração de uma revisão da literatura. Com o intuito de descrever, analisar e relacionar estudos sobre o biogás, esclarecendo as principais definições e processos acerca da utilização deste biocombustível.

Metodologia

O presente trabalho foi elaborado por meio de uma revisão na literatura, no qual extraiu-se dados nacionais e internacionais de pesquisas na área de bioenergias com foco no biogás. Para tanto, foram empregados os bancos de dados ScienceDirect e Google Acadêmico, bem como sites de órgãos referentes à área energética, tais como: Associação Brasileira de Biogás (ABiogás), Agência Internacional de Energia (IEA), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Balanço Energético Nacional (BEN), Centro Brasileiro de Infraestrutura (CBIE), Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS), Empresa de pesquisa energética (EPE) e Ministério de Minas e Energia (MME). A pesquisa realizada priorizou estudos e dados de referências publicadas a partir de 2016.

Revisão da literatura

Matriz energética e biocombustíveis

De acordo com Mantovani et al. (2017), a energia pode ser oriunda de fontes renováveis ou não renováveis, sendo que as fontes de energia não renováveis são consideradas limitadas e esgotáveis pois a sua regeneração na natureza demanda muito tempo. Dentre as fontes não renováveis encontram-se os combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e a energia oriunda da fissão nuclear. Já as fontes de energia renováveis não são esgotáveis e se apresentam disponíveis na natureza por um longo período. Dentre as fontes renováveis encontram-se a energia solar, a energia eólica, a energia hídrica e a biomassa, entre outras (MANTOVANI *et al.*, 2017).

A energia se tornou um fator responsável pelo bem-estar e qualidade de vida da população, sendo que a utilização e fornecimento de energia é um indicador primordial referente ao desenvolvimento e crescimento econômico de um país, utilizado para diversas finalidades dentro do setor industrial, comercial, doméstico e outros (PAIXÃO & MIRANDA, 2018).

Não obstante, o consumo global de energia ainda é baseado em fontes de energia não renováveis, fornecendo aproximadamente 86,1% das necessidades energéticas totais globais em 2018 quando somados os percentuais referentes ao petróleo, gás natural, carvão e nuclear (IEA, 2021). Segundo Axon e Darton (2021), a energia produzida a partir dos combustíveis fósseis, que apresentavam preços acessíveis, acabou por facilitar o vasto crescimento da sociedade e proporcionar uma melhoria dos padrões de vida no último século, tornando mais difícil a sua substituição. Porém, a dependência global dos combustíveis fósseis como fonte de energia vem gerando preocupações em relação à poluição ambiental e a sua característica não renovável (EPE, 2017).



O Brasil encontra-se na sétima posição em relação ao uso de petróleo no mundo, totalizando um consumo médio de 3,1 milhões de barris/dia de petróleo (ANP, 2019). A Figura 1 apresenta a matriz energética brasileira referente ao ano de 2019, cujo gráfico evidencia a predominância do petróleo e biocombustíveis como principais fontes energéticas. Ainda, é possível observar que 46,1% da energia produzida no Brasil foi oriunda de fontes renováveis no ano de 2019, quando somados os percentuais referentes à geração hidráulica, biocombustíveis, solar, eólica e outras fontes renováveis.

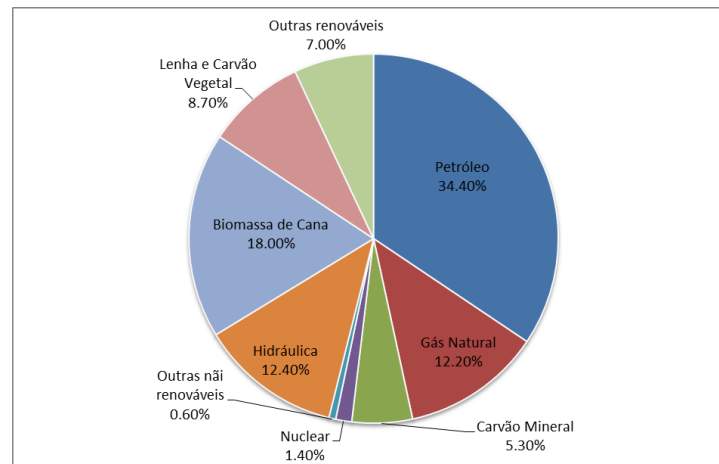


Figura 1 - Matriz energética brasileira em 2019.

Tendo em vista as desvantagens oriundas da utilização de combustíveis fósseis citadas anteriormente, as fontes de energias renováveis têm ganhado cada vez mais espaço na matriz energética mundial (ABOAGYE et al., 2021). Segundo Li et al. (2020), o Brasil, além possuir uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, foi um dos primeiros países a iniciar a utilização de combustíveis oriundos da biomassa como fonte de energia, se tornando o maior produtor e consumidor de biomassa. Ainda, de acordo com Carvalho (2014), os biocombustíveis podem ser promissores substitutos das atuais formas de energias, especialmente no transporte e na produção de energia elétrica.

De acordo com a ANP (2020), os biocombustíveis podem ser definidos como “derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia”. A produção de energia advinda de biocombustíveis na maioria dos países do mundo é movida basicamente em função da busca por segurança energética, pelo desenvolvimento do setor agrícola e pela geração de empregos, dependendo das necessidades de cada país. Segundo o relatório de combustível disponibilizado em outubro de 2019 pela Agência Internacional de Energia (IEA), a produção global de biocombustíveis bateu o recorde de 154 bilhões de litros em 2018.

No Brasil destacam-se três marcos históricos na inserção dos biocombustíveis no país: o Programa Nacional do Álcool, o PROALCOOL, lançado em 1975, a tecnologia flex-fuel, implementada em 2003, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) implementado em 2005 (EPE, 2017). Recentemente, com o intuito de expandir a produção e consumo de biocombustíveis no Brasil, em dezembro de 2016 foi lançada a RenovaBio (Política Nacional de Biocombustíveis), pelo Ministério de Minas e Energia, programa que tem como objetivo principal o estabelecimento de metas visando a descarbonização através do incentivo para a expansão dos biocombustíveis na matriz energética nacional (ANP, 2021).



Apesar de sua importância, o alto custo para produção dos biocombustíveis é um dos principais empecilhos para a ampliação do consumo de energias limpas em países subdesenvolvidos. De uma forma geral, a falta de infraestrutura, tecnologias de conversão ineficazes e indisponibilidade de matérias primas são responsáveis pela elevação do custo de produção dos biocombustíveis em países em desenvolvimento, tornando essa fonte de bioenergia mais cara e menos atrativa em relação aos combustíveis fósseis (AVINASH et al., 2018).

Biogás

De acordo com a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás), o biogás pode ser definido como um gás bruto produzido naturalmente pela decomposição de resíduos e efluentes orgânicos. Na produção do biogás o substrato, matéria orgânica, é decomposto por diferentes microrganismos em um ambiente anaeróbio, resultando em uma mistura de gases, predominando o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂).

Dados literários registram que o biogás foi descoberto por Shirley, em 1667. Porém, foi em 1776 que o pesquisador italiano Alessandro Volta descobriu a presença de gás metano incorporado ao chamado "gás dos pântanos". Em 1895, em uma estação de tratamento de efluentes na Inglaterra, foi documentada a coleta do biogás produzido pelo processo de digestão anaeróbia. Mas foi em 1941, na Índia que ocorreu o primeiro estudo voltado ao aproveitamento de biogás utilizando estrume e outros materiais. Ainda, no começo do século XX, na Índia e na China, se deu início ao desenvolvimento de biodigestores com a finalidade de produzir gás metano oriundo de esterco de animais, especialmente bovinos. Finalmente, em 1960, o processo de digestão anaeróbia passou a ser pesquisado em caráter mais científico (CETESB, 2020).

No Brasil, os primeiros relatos de estudos nacionais para utilização de biogás se iniciaram com a crise do petróleo em 1979. A Granja do Torto, localizada em Brasília, recebeu um dos primeiros biodigestores do país. A partir deste momento, o Governo Federal começou a desenvolver o Programa de Mobilização Energética (PME), estimulado pelo baixo custo e simplicidade dos materiais utilizados na construção dos biodigestores em áreas rurais. Ainda, com o intuito de reduzir a dependência por derivados de petróleo, o presidente João Figueiredo assinou o Decreto nº 87.079, em 2 de abril de 1982, do PME, buscando no biogás uma alternativa para racionalizar a utilização da energia.

No entanto, alguns problemas de operação fizeram com que a tecnologia entrasse em colapso e fosse abandonada. Entre os anos 1990 e 2000, o biogás voltou a ser discutido no Brasil como alternativa para reduzir as emissões de GEE por meio de projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e seus respectivos créditos de carbono (CIBIOGAS, 2020). Segundo Freitas et al. (2019), a tecnologia de produção do biogás não recebeu a importância merecida durante muito tempo (1970-2010), tornando esta alternativa energética ainda principiante no Brasil, sendo que somente a partir de 2010 o biogás passou a ser utilizado na geração de energia, passando a ser considerado um ativo energético e não mais um passivo ambiental.

De acordo com os dados divulgados pelo Panorama do Biogás no Brasil, no ano de 2020 encontravam-se em operação no país 638 usinas de biogás, sendo identificadas 675 plantas ao todo. Em 2020 foram contabilizadas 148 novas plantas de biogás, representando um aumento de 22% em relação ao ano anterior, o que evidencia o contínuo crescimento do setor. Assim como a quantidade de plantas, o volume de biogás produzido também apresentou um crescimento nos últimos anos. Em 2020 foi registrado o volume de 1,83



bilhão de Nm^3 de biogás produzido pelas plantas em operação (CIBIOGÁS, 2021). Segundo o mesmo Panorama, a previsão é que após o início da operação de 37 plantas produtoras de biogás, que estão em fase de implantação ou em reforma, o Brasil atingirá uma produção anual de 2,2 bilhões de Nm^3 . A figura 2 demonstra o crescimento da produção de biogás no Brasil ao longo dos anos.

Ainda, de acordo com a Abiogás (2021), o país apresenta um potencial de produção equivalente a 82 bilhões de Nm^3 /ano, considerando 41 bilhões do setor sucroenergético, 37 bilhões do setor agropecuário e 3 bilhões do setor de saneamento ambiental. Sendo assim, os 1,83 bilhão de Nm^3 de biogás produzido em 2020 representam apenas 2% do potencial nacional.

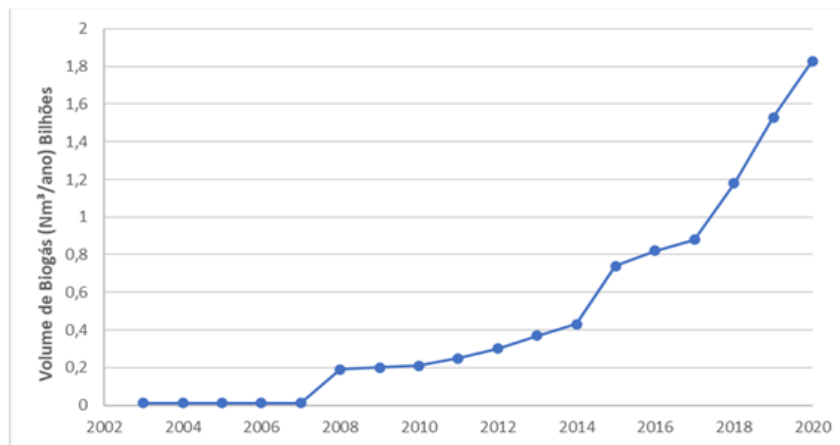


Figura 2 - Crescimento da produção de biogás no Brasil ao longo dos anos.

O estado de São Paulo ocupa a primeira posição com 39% do volume total de biogás produzido no Brasil, e na sequência o Rio de Janeiro com 18%. Na Figura 3 está expressa a distribuição da produção de biogás do Brasil entre os estados em 2020.

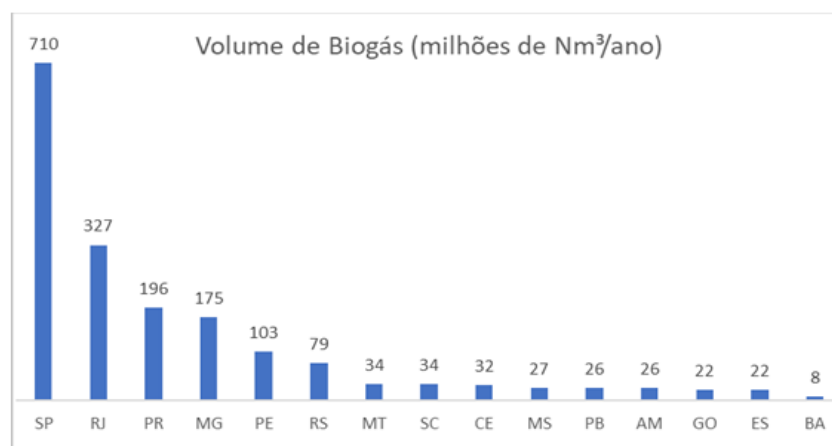


Figura 3 - Distribuição do volume de biogás produzido no Brasil em 2020.

As projeções da produção de etanol e açúcar apresentadas pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 divulgado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2021) indicam elevada quantidade de resíduos deste setor que podem ser destinados à produção de biogás. Sendo assim, levando em conta que todo esse resíduo composto pela vinhaça e a



torta de filtro será destinado para a biodigestão, o potencial de biogás alcançará 6,9 bilhões de N m³ em 2030.

Matérias primas

O biogás pode ser produzido a partir de diferentes tipos de matérias primas. Dentre elas destacam-se os resíduos alimentares, resíduos agrícolas, estrume animal, resíduos de aves, resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, resíduos florestais, microalgas e culturas energéticas (ZABED et al., 2020).

A principal fonte de matéria prima utilizada para produção de biogás no Brasil é a agropecuária (MME, 2021). Segundo o panorama do biogás no Brasil 2020, este setor conta com 79% das plantas em operação no país, apesar do volume total produzido em 2020 ter sido de apenas 11%, correspondente a 203.048.019 Nm³/ano. Os substratos oriundos da indústria, contaram com 12% das plantas e 16% do volume total em 2020 (283.795.333 Nm³/ano). Já as plantas que utilizam os resíduos sólidos urbanos ou efluentes de estações de tratamento de esgoto como substrato possuem apenas 9% das plantas em operação, porém, apresentam uma elevada contribuição no volume de produção, totalizando 1.342.221.982 Nm³/ano, ou seja, 73% do biogás produzido no país (CIBIOGÁS, 2021). Essa relação entre o número de plantas e em operação e o volume de biodiesel produzido no Brasil pode ser visualizada na Figura 4.

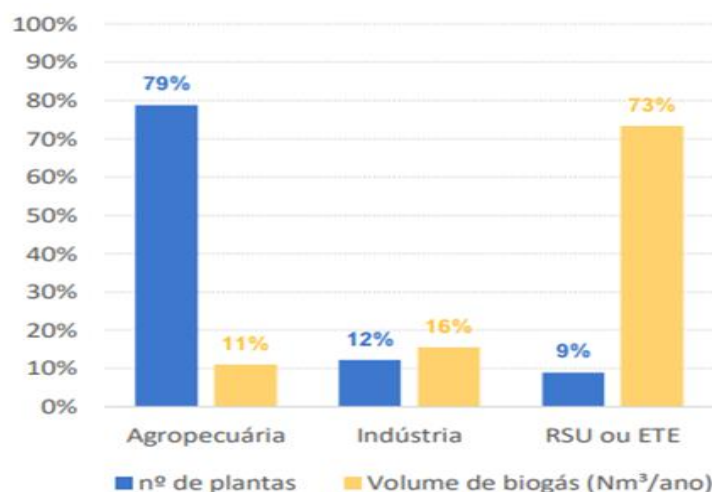


Figura 4 - Relação entre número de plantas em operação e volume de biogás produzido no Brasil em 2020.

Digestão anaeróbica e composição do biogás

A digestão anaeróbica representa uma sequência de procedimentos biológicos nos quais os microrganismos decompõem, na ausência de oxigênio, a matéria orgânica presente no substrato (PRABHU et al. 2020). Este processo pode ser decomposto em quatro fases conhecidas como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Durante a hidrólise, enzimas são liberadas por bactérias hidrolíticas que tornam possível a degradação de carboidratos, lipídios e proteínas, transformando-os em compostos disponíveis para os microrganismos. Na acidogênese, segunda etapa do processo, os compostos formados a partir da hidrólise são decompostos em ácidos graxos voláteis e álcoois. Já na acetogênese, os microrganismos degradam os ácidos graxos



voláteis e álcoois em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, a metanogênese, última etapa do processo, é responsável pela transformação de todos os compostos formados anteriormente em metano (KASINATH et al., 2021). Não obstante, para a produção de biogás ser satisfatória faz-se necessário o estabelecimento de uma condição ideal de certos parâmetros (ausência de oxigênio, composição do substrato, temperatura e pH do meio) com o objetivo de elevar a atividade e crescimento dos principais microrganismos presentes no processo (WU et al., 2021).

De uma maneira geral, os principais componentes presentes no biogás são Metano (CH_4) e Dióxido de carbono (CO_2). Geralmente, a porcentagem dessas duas frações varia com o tipo de material orgânico utilizado, bem como com o tipo de tratamento anaeróbico. Além desses dois gases principais, o biogás também contém traços de outros gases incluindo o hidrogênio (H_2): 0% a 1% do volume; gás sulfídrico (H_2S): 0% a 3% do volume; oxigênio (O_2): 0% a 2% do volume; amoníaco (NH_3): 0% a 1% do volume; e nitrogênio (N_2): 0% a 7% do volume (CETESB, 2020).

O potencial energético do biogás depende principalmente de sua concentração de metano (CH_4), sendo que o biogás que apresenta uma elevada porcentagem de CH_4 em sua composição pode ser considerado de boa qualidade, possuindo um elevado valor de aquecimento e produzindo uma chama de coloração azul. Já a presença de contaminantes no biogás, como o dióxido de carbono (CO_2), acaba reduzindo seu potencial energético e consequentemente diminui a qualidade do biocombustível (ROSHA et al., 2018).

De acordo com Khan et al. (2021), os principais contaminantes devem ser removidos antes do biogás ser utilizado como substituto ao gás natural. Segundo esses autores, o sulfeto de hidrogênio presente no biogás bruto pode causar corrosão em elementos metálicos das caldeiras, motores de combustão interna e gasodutos.

Diante da presença de contaminantes, torna-se necessária a implantação de tecnologias capazes de purificar esse biocombustível, promovendo maior qualidade e eficiência. Alguns tratamentos são capazes de atingir altos níveis de purificação, porém apresentam maior complexidade e contam com um custo mais elevado. Ainda, existem casos em que podem ser aplicados tratamentos de menor complexibilidade e custo, desde que se encontrem dentro dos padrões estabelecidos para dada utilização (DA SILVA & MEZZARI, 2019).

A remoção do dióxido de carbono presente no biogás vai proporcionar um aumento da densidade energética e consequentemente a concentração de biometano existente. Dessa forma, o biogás passa a poder ser utilizado como combustível para caldeiras, fogões, motores e turbinas a gás para produzir eletricidade, bem como pode ser usado como combustível para veículos e células a combustível (MULU, M'ARIMI & RAMKAT, 2021). Várias tecnologias foram desenvolvidas para separação do CO_2 do biogás, sendo que, entre as tecnologias utilizadas, destacam-se a adsorção por oscilação de pressão, absorção com solventes químicos, lavagem com água, lavagem com solvente orgânico, separação por membranas e separação criogênica (KHAN et al., 2021).

Segundo Zhang et al. (2021), dentre as tecnologias atuais para remoção de H_2S o foco vem sendo para tratamentos baseados em absorção de gás líquido, materiais à base de óxido de ferro ou adsorção de carvão ativado e degradação biológica. Maile, Muzenda & Tesfagiorgis (2016), complementam ainda que a utilização da absorção química como tecnologia de purificação se mostra eficiente para a remoção de dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio, tendo em vista que o processo resulta em um biogás com elevada presença de metano (aproximadamente 95%), tornando possível a sua utilização em larga escala.



Ainda, vale destacar um subproduto obtido através da fermentação anaeróbica de resíduos vegetais, dejetos de animais ou resíduos de alimentos em um processo de biogás, o biofertilizante (KARLSSON et al., 2014). A produção de biogás, portanto, é responsável pela geração de um resíduo rico em nutrientes, que pode ser administrado e descartado de forma correta ou pode ser utilizado como biofertilizante na agricultura (IOANNOU-TTOFA et al. 2021).

Diversos artigos têm demonstrado formas de utilização deste resíduo da produção do biogás. O estudo de Veroneze et al. (2019) demonstra que o material resultante da co-digestão anaeróbia de resíduos de suínos e doses de glicerina pode ser empregado como biofertilizante na agricultura. Ioannou-ttofa et al. (2021) relatam que a utilização do resíduo do processamento do biogás como biofertilizante parece contribuir com a sustentabilidade de forma a proporcionar uma redução de aproximadamente 38% da pegada ambiental. De acordo com Yong, Bashir & Hassan (2021), o biofertilizante pode ser usado e vendido para indústrias agrícolas, incentivando o desenvolvimento econômico concomitante com a sustentabilidade na área de gestão de resíduos.

Considerações finais

Conforme apresentado nesta revisão, o biogás apresenta-se como uma alternativa viável de energia renovável e sustentável para a crescente demanda mundial por energia, sendo que o biogás, por mais que apresente uma baixa participação na matriz energética brasileira, encontra-se em constante expansão. Ainda, entende-se que o alto custo para produção dos biocombustíveis é um dos principais empecilhos para a ampliação do consumo de energias limpas alternativas aos combustíveis fósseis em países subdesenvolvidos.

Ao observar o trabalho nota-se que há um potencial energético considerável e diversificado de resíduos a ser aproveitado, dentre os quais se destacam a vinhaça e a torta de filtro para a produção de biogás, fruto da grande produção nacional de etanol e açúcar. Além do ganho energético, a utilização desses substratos para geração de biogás contribuiria para uma melhor gestão ambiental das regiões produtoras.

Através da revisão conclui-se que a aplicação de tecnologias para purificação do biogás permite a utilização deste biocombustível como fonte energética de excelente qualidade oportunizando a redução do consumo de gás natural, minimizando a dependência dos combustíveis fósseis, contribuindo para o balanço energético global e reduzindo significativamente as emissões dos gases de efeito estufa. Ainda, a produção de biogás também é responsável pela geração de resíduos ricos em nutrientes que podem ser utilizados como biofertilizante na agricultura. Diversos artigos têm demonstrado formas de utilização deste resíduo e o seu uso parece ser ambientalmente sustentável.

Conflito de interesses

Os autores deste manuscrito não declaram conflito de interesse.

Referências

ABILOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. **Potencial da geração do Biogás chega a 40% da usina de Itaipu**. 2020. Disponível em: < <https://abiogas.org.br/potencial-de-geracao-do-biogas-chega-a-40-da-usina-de-itaipu/>>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2021.



ABIOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano**. 2021. Disponível em: < https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/PNBB_Versao_Final.pdf> Acesso em: 05 de julho de 2021.

ABOAGYE, B.; GYAMFI, S.; OFOSU, E. A.; DJORDJEVIC, S. Status of renewable energy resources for electricity supply in Ghana. **Scientific African**, p. e00660, 2021.

ANP – Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural. **Panorama internacional**. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/anuario-2019-texto-secao-1.pdf>>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **RenovaBio**. 2021. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>> Acesso: 24 de fevereiro de 2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Biocombustíveis**. 2020. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis>>. Acesso em: 04 de março de 2021.

AVINASH, A.; SASIKUMAR, P.; MURUGESAN, A. Understanding the interaction among the barriers of biodiesel production from waste cooking oil in India-an interpretive structural modeling approach. **Renewable Energy**, v. 127, p. 678-684, 2018.

AXON, C. J.; DARTON, R. C. Sustainability and risk—a review of energy security. **Sustainable Production and Consumption**, v.27, p.1195-1204, 2021.

BEN – Balanço Energético Nacional. **Relatório Síntese**. 2020. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf> Acesso em: 09 de fevereiro de 2021.

BHUTTO, A. W.; BAZMI, A. A.; ZAHEDI, G. Greener energy: Issues and challenges for Pakistan—Biomass energy prospective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3207-3219, 2011.

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. **Estudos avançados**, v. 28, n. 82, p. 25-39, 2014.

CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura. **O que são biocombustíveis?** Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/o-que-sao-biocombustiveis/>> Acesso: 15 de janeiro de 2021.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Biogás**. 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>>. Acesso em: 30 de junho de 2021.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis. **Panorama do biogás no Brasil 2020**. 2021. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/wp->



content/uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1_1.pdf>. Acesso em: 05 de julho de 2021.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis. **O que é biometano? Aposte no futuro da mobilidade sustentável.** 2020. Disponível em: < <https://cibiogas.org/blog-post/o-que-e-biometano-aposte-no-futuro-da-mobilidade-sustentavel/>>. Acesso em: 27 de julho de 2021.

CHENG, J. J.; TIMILSINA, G. R. Status and barriers of advanced biofuel technologies: a review. **Renewable Energy**, v. 36, n. 12, p. 3541-3549, 2011.

DA SILVA, M. L. B.; MEZZARI, M. P. **Tratamento e purificação de biogás.** Embrapa Suínos e Aves-Capítulo em livro científico (ALICE), 2019.

EPE – Empresa de pesquisa energética. **Matriz energética e elétrica.** 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em: 08 de fevereiro de 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica: Papel dos biocombustíveis na matriz.** 2017. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/EPE%20-%20NT1%20-%20PAPEL%20DOS%20BIOCOMBUST%20C3%8DVEIS%20-%20ARQUIVO%201.pdf>>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2021.

FREITAS, F. F.; DE SOUZA, S. S.; FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; ALESSIO, F. J.; DE SOUZA, S. N. M.; VENTURINI, O. J.; ANDO JUNIOR, O. H. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-157, 2019.

GIWA, A. S. N.; ALI I.; AHMAD M.; ASIF R. B.; GUO F. L.; LI, M.; LU. Prospects of China's biogas: Fundamentals, challenges and considerations. **Energy Reports**, v. 6, p. 2973-2987, 2020.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, L. M., CORREA, D. F., RYAN, S., JENSEN, P. D., PRATT, S., & SCHENK, P. M. Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, p.1137-1148, 2018.

IEA - Agência Internacional de Energia. **Dados e estatísticas.** 2021. Disponível em: < <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2021.

IOANNOU-TTOFA, L.; FOTEINIS, S.; MOUSTAFA, A. S.; ABDELSALAM, E.; SAMER, M.; FATTA-KASSINOS, D. Life cycle assessment of household biogas production in Egypt: Influence of digester volume, biogas leakages, and digestate valorization as biofertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125468, 2021.



JEBLI, M. B.; YOUSSEF, S. B. The role of renewable energy and agriculture in reducing CO₂ emissions: Evidence for North Africa countries. **Ecological indicators**, v. 74, p. 295-301, 2017.

KARLSSON, TOMMY et al. **Manual básico de biogás**. 1ª edição. Univates, 2014.

KASINATH, A.; FUDALA-KSIAZEK, S.; SZOPINSKA, M.; BYLINSKI, H.; ARTICHOWICZ, W.; REMISZEWSKA-SKWAREK, A.; LUCZKIEWICZ, A. Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111509, 2021.

KHAN, M. U.; LEE, J. T. E.; BASHIR, M. A.; DISSANAYAKE, P. D.; OK, Y. S.; TONG, Y. W.; SHARIATI, M. A.; WU, S.; AHRING, B. K. Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111343, 2021.

KIWJAROUN, C.; TUBTIMDEE, C.; PIUMSOMBOON, P.. LCA studies comparing biodiesel synthesized by conventional and supercritical methanol methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 2, p. 143-153, 2009.

LI, L.; LIN, J.; WU, N.; XIE, S.; MENG, C.; ZHENG, Y.; WANG, X.; ZHAO, Y. Review and Outlook on the International Renewable Energy Development. **Energy and Built Environment**, v.14, n.16, 4811, 2020.

MAILE, O. I.; MUZENDA, E.; TESFAGIORGIS, H. Chemical Absorption of Carbon Dioxide in Biogas Purification. **Procedia Manufacturing**, v.7, p.639-646, 2016.

MANTOVANI, P. R. A.; NEUMANN, P. N.; EDLER, M. A. R. Matriz Energética Brasileira: Em busca de uma nova alternativa. **Revista Interdisciplinar De Ensino, Pesquisa E Extensão-RevInt**, v.4, n.1, 2017.

MISHRA, A.; KUMAR, M.; BOLAN, N. S.; KAPLEY, A.; KUMAR, R.; SINGH, L. Multidimensional approaches of biogas production and up-gradation: Opportunities and Challenges. **Bioresource Technology**, p. 125514, 2021.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf> Acesso em: 04 de março de 2021.

MULU, E.; M'ARIMI, M. M.; RAMKAT, R. C. A review of recent developments in application of low cost natural materials in purification and upgrade of biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 145, p. 111081, 2021.

PAIXÃO, M. A. S.; MIRANDA, S. H. G. Um comparativo entre a política de energia renovável no Brasil e na China. **Pesquisa & Debate. Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Economia Política**, v. 29, n. 1 (53), 2018.



PRABHU, A.V., SIVARAM, A.R., PRABHU, N., SUNDARAMAHALINGAM, A. A study of enhancing the biogas production in anaerobic digestion. *Materials Today: Proceedings*, 2021.

RIBEIRO, N. S.; BARROS, R. M.; DOS SANTOS, I. F.; TIAGO FILHO, G. L.; DA 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, p. 101552, 2021.

ROSHA, P.; DHIR, A.; MOHAPATRA, S. K. Influence of gaseous fuel induction on the various engine characteristics of a dual fuel compression ignition engine: a review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 3333-3349, 2018.

VERONEZE, M. L.; SCHWANTES, D.; GONÇALVES, A. C.; RICHART, A.; MANFRIN, J.; DA PAZ SCHILLER, A.; SCHUBA, T. B. Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses. **Journal of cleaner production**, v.213, p.176-184, 2019.

WU, D.; PENG, X.; LI, L.; YANG, P.; PENG, Y.; LIU, H.; WANG, X. Commercial biogas plants: Review on operational parameters and guide for performance optimization. **Fuel**, v. 303, p. 121282, 2021.

YONG, Z. J.; BASHIR, M. J. K.; HASSAN, M. S. Biogas and biofertilizer production from organic fraction municipal solid waste for sustainable circular economy and environmental protection in Malaysia. **Science of The Total Environment**, v. 776, p. 145961, 2021.

ZABED, H. M.; AKTER, S.; YUN, J.; ZHANG, G.; ZHANG, Y.; QI, X. Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109503, 2020

ZHANG, Y.; KAWASAKI, Y.; OSHITA, K.; TAKAOKA, M.; MINAMI, D.; INOUE, G.; TANAKA, T. Economic assessment of biogas purification systems for removal of both H₂S and siloxane from biogas. **Renewable Energy**, v. 168, p. 119-130, 2021.