

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

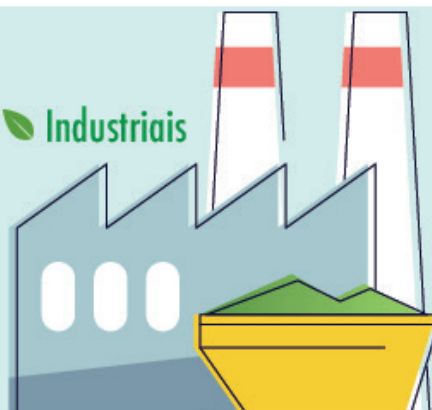
Ambiente

Aproveitamento de resíduos

Animais



Industriais

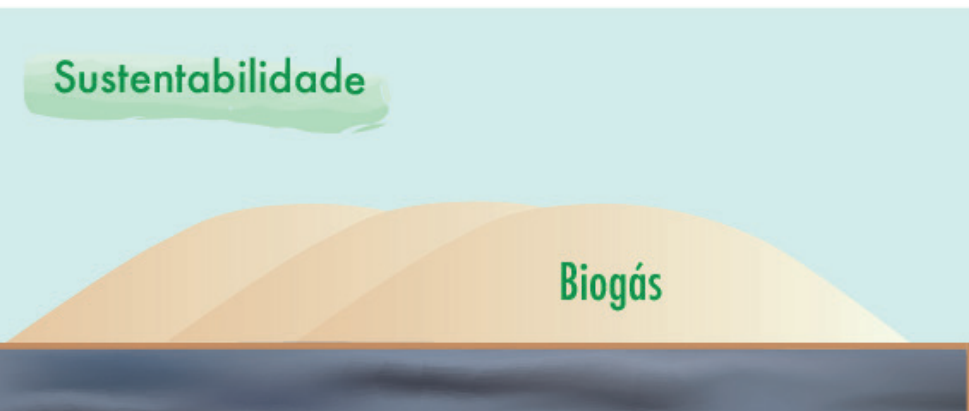


Urbanos



Sustentabilidade

Biogás



Biofertilizante



Aquecimento



Governança

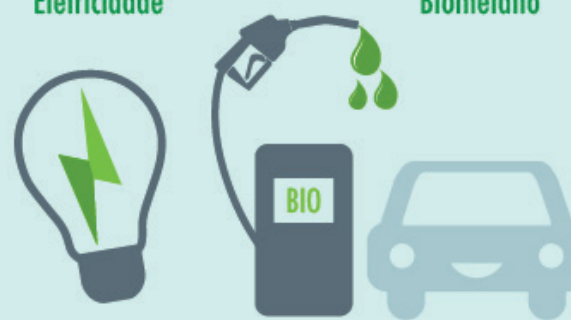


Social

Embrapa

Eletricidade

Biometano



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 49

Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Itânia Pinheiro Soares
Emerson Léo Schultz
Rossano Gambetta
Sílvia Belém Gonçalves

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770-901, Brasília, DF
Fone: +55 (61) 3448-1581
Fax: +55 (61) 3448-1589
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações (CLP)

Presidente
Patricia Verardi Abdelnur

Secretária-executiva
Lorena Costa Garcia Calsing

Membros
Alexandre Nunes Cardoso
Betulia de Moraes Souto
João Ricardo Moreira de Almeida
Leonardo Fonseca Valadares
Melissa Braga
Patricia Abrao de Oliveira Molinari
Priscila Seixas Sabaini

Revisão de texto
Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Márcia Maria Pereira de Souza (CRB-1/1441)
Rejane Maria de Oliveira Cechinel Darós (CRB-1/2913)

Projeto gráfico
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Júlio César da Silva Delfino

Capa
Maria Goreti Braga dos Santos

1ª edição

Publicação digital (2022): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa, Superintendência de Comunicação

Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável / Itânia Pinheiro
Soares ... [et al]. – Brasília, DF : Embrapa Agroenergia, 2022.

PDF (29 p.) : il. color. – (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-4439 ; 49).

1. Biocombustível. 2. Recurso renovável. 3. Biometano. 4. Resíduo orgânico. I. Schultz,
Emerson Léo. II. Gambetta, Rossano. III. Gonçalves, Sílvia Belém. IV. Título. V. Série.

CDD (21. ed.) 633.85

Rejane Maria de Oliveira Cechinel Darós (CRB-1/2913)

© 2022 Embrapa

Autores

Itânia Pinheiro Soares

Química, doutora em Química, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Emerson Léo Schultz

Engenheiro químico, doutor em Engenharia Química, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Rossano Gambetta

Engenheiro químico, doutor em Engenharia Química, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Silvia Belém Gonçalves

Engenheira química, doutora em Engenharia Química, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Apresentação

A história da produção e utilização do biogás pode ser considerada remota. Existem registros de produção em grande escala desde a segunda metade do século XIX, mas ocorrendo com maior projeção durante a II Guerra Mundial, motivada pela escassez dos recursos fósseis. Já no Brasil, teve início na década de 1970, com a crise do petróleo. No entanto, a falta de informação e treinamento e a baixa eficiência dos sistemas fizeram com que muitos investimentos fossem descontinuados ou abandonados.

Nos últimos anos, em virtude da celebração de acordos mundiais na tentativa de frear as mudanças climáticas provocadas principalmente pela queima de combustíveis fósseis, o biogás passou a ter grande destaque no cenário mundial. Primeiramente, devem-se considerar as diferentes possibilidades de matérias-primas para produção do biocombustível, sobretudo os materiais residuais e efluentes provenientes de diferentes setores, como urbano, industrial e de atividades agropecuárias. Dessa forma, se torna ainda mais relevante porque gera energia e reduz impacto ambiental negativo, dos referidos setores. Além disso, o grande interesse por biometano, hidrogênio, digestato, e outros bioprodutos que podem ser obtidos, tem dado relevância ao biogás, propiciando um crescente investimento na construção de novas plantas e ampliação de plantas existentes.

No presente trabalho foi feita uma revisão da literatura, abordando desde a produção de biogás, incluindo tipos de biodigestores, matérias-primas e bioprodutos, até as formas de utilização do biogás e biometano. Apresentados esses tópicos, foi feita a correlação das possíveis contribuições da cadeia do biogás com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS). Por ser um dos temas trabalhados na Embrapa Agroenergia, foram elencados os projetos recém-finalizados e projetos em execução na temática, fazendo a ligação quanto à colaboração para o alcance dos ODS e suas respectivas metas.

Boa leitura!

Alexandre Alonso Alves
Chefe-Geral da Embrapa Agroenergia

Sumário

Introdução	9
Processo de biodigestão	9
Matérias-primas para a produção de biogás e biometano	11
Resíduos agroindustriais	12
Resíduos agrícolas	13
Esgoto sanitário	14
Resíduos sólidos urbanos	14
Matérias-primas dedicadas à produção de biogás e biometano	15
Utilização de biogás e biometano	16
Energia térmica e elétrica	16
Biometano	18
Produtos químicos e combustíveis líquidos	18
Contribuições do biogás para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	19
ODS 2. Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável	19
ODS 3. Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades	20
ODS 7. Garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos	20
ODS 8. Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos	21
ODS 11. Cidades e comunidades sustentáveis	21
ODS 13. Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos	22
Projetos da Embrapa Agroenergia relacionados com biogás	22
Considerações finais	24
Referências	25

Introdução

A busca por novas fontes de energia, atrelada à grande necessidade de redução das emissões de gases poluentes, tem demandado cada vez mais a atenção de pesquisas na utilização de recursos renováveis.

Nesse sentido, uma alternativa que tem ganhado grande destaque mundial é a produção de biogás. No Brasil, esse biocombustível representa menos de 1% da matriz energética (Empresa de Pesquisa Energética, 2022), mas vem se tornando cada dia mais relevante no cenário nacional. No ano de 2021, havia 755 plantas de biogás em operação, um aumento de 20% no número de plantas em relação ao ano de 2020 (Biogasdata, 2022). Portanto, o biogás possui potencial gigantesco de crescimento no País. Um estudo desenvolvido pela Associação Brasileira de Biogás e Biometano - ABiogás, em 2018, indicou que o Brasil possui o potencial de produção de biogás de 84,6 bilhões de m³/ano (Abiogás, 2022a).

O biogás é constituído principalmente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e outros constituintes minoritários, como sulfeto de hidrogênio (H₂S), nitrogênio (N₂), vapor de água (H₂O) e amônia (NH₃). O biogás é obtido pela digestão anaeróbia de efluentes industriais, dejetos de animais e/ou lodo de esgoto (Angelidaki et al., 2018). O processo é realizado na ausência de oxigênio em equipamentos conhecidos como biodigestores. Possui vantagens como: (1) produção a partir de resíduos orgânicos disponíveis nas regiões; (2) produção próxima ao local de consumo, sem grandes investimentos na construção de gasodutos; e (3) solução a passivos ambientais que se tornam ativos energéticos.

Processo de biodigestão

A biodigestão é um processo que ocorre naturalmente na natureza, com a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio (processo anaeróbio), liberando metano e gás carbônico, enquanto a massa residual, o digestato, é enriquecida com os minerais que compunham a biomassa original. Os gases gerados na biodigestão são gases causadores do efeito estufa, sendo que o metano tem potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao dióxido de carbono (Myhre et al., 2014).

A aplicação do processo de biodigestão aos resíduos do agronegócio é uma forma interessante de destinar os resíduos e gerar renda. De outra forma, tais resíduos poderiam causar impacto ambiental negativo ao meio ambiente. No processo, a produção de metano é otimizada e devidamente coletada, podendo então ser destinada para geração de energia térmica, elétrica, ou, quando o gás é devidamente purificado, dar origem ao biometano, que tem aplicação veicular e industrial, equivalente à sua contraparte fóssil, o gás natural. Dentre as aplicações industriais, está a produção de hidrogênio por reforma a vapor, que tem potencial de uso em veículos elétricos com célula combustível, além de outras utilizações, como nos processos de hidrotreatamento em refinarias, na produção de amônia, na indústria metalúrgica e indústria de alimentos (Avargani et al., 2022).

O projeto de uma planta de biodigestão compreende várias etapas, desde a escolha da matéria-prima e seu condicionamento, até o próprio reator e as etapas subsequentes de separação e purificação dos produtos gerados.

Os biodigestores são o coração da planta de biodigestão. É neles que as biomassas residuais ou cultivadas são convertidas pela ação dos microrganismos (e suas respectivas reações químicas e bioquímicas) em biogás e digestato. Existem diferentes tipos de biodigestores ou reatores anaeróbios, como reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (*upflow anaerobic sludge*

blanket reactor (UASB)), reator de tanque de agitação contínua (*continuous stirred tank reactor* (CSTR)), reator de lagoa coberta ou reator de fluxo pistonado, reator anaeróbio de leito fixo (filtro anaeróbio), reator anaeróbio de leito rotativo, reator anaeróbio de leito fluidizado e reator em fase sólida (Chernicaró, 2007; Kunz et al., 2019).

Com o desenvolvimento tecnológico na área de digestão anaeróbia, foram desenvolvidos reatores de alta taxa de reação, nos quais conhecimentos de engenharia foram aplicados de forma a reduzir o tempo de retenção hidráulica, utilizando artifícios como agitação, aquecimento e estratégias para reter os microrganismos dentro do reator. A maioria dos reatores citados anteriormente, como UASB, CSTR, filtro anaeróbio e leito fluidizado, enquadra-se nessa categoria (Rocha-Meneses et al., 2022). Segundo Kunz et al. (2019), os principais modelos empregados na biodigestão são: (1) o modelo indiano e a sua variação chinesa, e o modelo de lagoa coberta, que basicamente é um reator de fluxo empistonado; (2) o modelo UASB, que é uma variação do reator de leito fluidizado; e (3) o modelo mistura completa, que é reator do tipo tanque de agitação contínua (CSTR). O biodigestor de lagoa coberta, também conhecido como modelo canadense, é o menos tecnificado, indicado para trabalhar com percentual total de sólidos entre 0,5% e 5% e tempo de retenção hidráulica de 30 a 60 dias, sendo indicado para regiões de clima quente. Já o biodigestor do tipo fluxo empistonado trabalha com percentual total de sólidos entre 12% e 15%, com tempo de retenção hidráulica de cerca de 20 dias, sendo apropriado para todos os climas. O biodigestor de mistura completa apresenta um maior nível de tecnologia, trabalha com percentual total de sólidos entre 12% e 15%, tempo de retenção hidráulica de pelo menos 20 dias, já é apropriado para todos os climas e possibilita a codigestão de matérias-primas. A codigestão é a digestão anaeróbia de uma mistura de dois ou mais substratos que são complementares, resultando em elevada degradação da matéria orgânica e grande rendimento de biogás (Sunada et al., 2018). Com um nível maior de tecnologia, aparece o reator de leito fluidizado, que apresenta tempo de retenção hidráulica de cinco dias, porém, é indicado para operação com percentual total de sólidos menor que 3%. Indicado para um percentual total de sólidos maior que 25%, o reator de fase sólida trabalha com um tempo de retenção hidráulica de 20 a 30 dias, e pode operar em codigestão (Empresa de Pesquisa Energética, 2022).

Independentemente do tipo do reator, os principais parâmetros que necessitam ser controlados nos reatores são: pressão parcial de hidrogênio, temperatura, pH, alcalinidade, concentração de ácidos voláteis, nutrientes, nitrogênio amoniacal e amônia livre (Kunz et al., 2019). O controle dessas variáveis pode ser favorecido, ou não, em função do tipo de reator escolhido.

A escolha do biodigestor é definida, segundo Kunz et al. (2019), pelos seguintes fatores: sistema de alimentação, temperatura do reator, número de fases e sistema de agitação, cujas principais considerações são apresentadas na Tabela 1.

A operação dos biodigestores é outro fator que deve ser levado em conta, por exemplo, utilizando estratégias de codigestão, em que duas ou mais matérias-primas são submetidas à biodigestão, com o intuito de equilibrar parâmetros do reator. Nesse sentido, a relação carbono/nitrogênio deve ser mantida entre 15 e 30, ou pode-se utilizar dois biodigestores em série, a fim de aumentar a eficiência ao final do processo.

Rocha-Meneses et al. (2022) reportam que os desafios atuais estão relacionados com o aproveitamento de biomassas lignocelulósicas (recalcitrantes) e com o efeito de seu uso no tempo de retenção e eficiência do sistema, otimização do inóculo e seu efeito sobre a eficiência, e estabilidade e robustez do processo, uso de pré-tratamento para biomassas lignocelulósicas e seu impacto sobre a economia do processo de biodigestão, além do acúmulo de amônia e ácidos graxos voláteis que também impacta na eficiência do processo.

Tabela 1. Fatores para escolha do sistema de biodigestão.

Tecnologia	Pontos de atenção	Opções
Sistema de alimentação	Modelo de biodigestor e matéria-prima	<ul style="list-style-type: none"> Alimentação descontínua para biodigestores de batelada. Alimentação contínua ou semicontínua para fluxo em pistão/digestores CSTR. Alimentação sólida ou líquida, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato.
Temperatura do biodigestor	Risco da presença de microrganismos patogênicos	<ul style="list-style-type: none"> Temperaturas mesofílicas (30 °C a 40 °C) quando não há risco da presença de microrganismos patogênicos. Temperaturas termofílicas (50 °C a 60 °C), quando houver risco da presença de microrganismos patogênicos (exemplo: lixo orgânico doméstico, esgoto doméstico).
Número de fases	Composição do substrato/risco de acidificação	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de uma fase quando não houver risco de acidificação. Sistema de duas fases para substratos com elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação.
Sistema de agitação	Teor de matéria-prima seca	<ul style="list-style-type: none"> Agitadores mecânicos para alto teor de sólidos no biodigestor. Agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixo teor de sólidos no biodigestor.

Fonte: Adaptado de Kunz et al. (2019).

Matérias-primas para a produção de biogás e biometano

A partir da biodigestão, a formação do metano é um processo biológico que ocorre naturalmente quando uma matéria orgânica (biomassa) se decompõe em uma atmosfera úmida na ausência de oxigênio, por meio da ação de um grupo de microrganismos metabolicamente ativos. Quando se trata de produção de biogás, o substrato é toda biomassa (matéria orgânica de origem vegetal ou animal) usada com a finalidade de produzir combustível gasoso por meio do processo de digestão anaeróbia. Deste modo, toda matéria orgânica é considerada uma matéria-prima para a produção de biogás e biometano.

A composição do substrato pode ser alterada drasticamente, de um lote para outro, o que pode ocasionar alguns problemas durante o processo de biodigestão, pois para promover uma boa reação é preciso, por exemplo, manter a relação carbono/nitrogênio em torno de 25 e 35:1 (Resch et al., 2011). Outro parâmetro importante que é totalmente dependente da matéria-prima é o teor de sólidos totais, que não pode ser muito diluído nem muito concentrado. Dependendo do modelo de biodigestor este valor pode variar entre 8% e 10% para reatores tipo canadense e podendo chegar acima de 40% para reatores tipo CSTR (*continuous stirred-tank reactor*) ou alemães (Cata Saady; Mosse, 2015). O teor de ácidos orgânicos voláteis também é determinante na eficiência do processo de biodigestão, pois um aumento destes ácidos durante a reação pode levar a um ambiente de baixo pH, o que causará problemas nas reações metanogênicas, etapa crucial para a produção de biogás. Em condições mais drásticas, isso pode ocasionar a morte do biodigestor (Sieget; Banks, 2005).

Existe uma grande variedade de matérias-primas para produção de biogás e biometano. Além disso, é importante mencionar o aumento da utilização de matérias-primas dedicadas, como milho e gramíneas. A Tabela 2 mostra alguns exemplos para possíveis substratos residuais.

Tabela 2. Resíduos de atividades industriais, agrícolas e agroindustriais utilizados para a produção de biogás e biometano.

Atividade Produtiva	Resíduos e Efluentes
Agricultura e Pecuária	Cascas, fezes, urina, palha e substratos utilizados no recobrimento de currais
Cervejarias	Bagaço de malte, restos de filtro e efluentes
Curtume	Resíduos das operações de descarte e divisão de tripa, licores de curtimento sem cromo e lodo de sistemas de tratamento
Indústrias farmacêuticas	Efluentes e resíduos com alto teor de substâncias biodegradáveis
Panificação	Efluentes da produção, resíduos da limpeza e lotes de produtos inadequados ao consumo
Produção de açúcar e etanol	Vinhaça, torta de filtro e bagaço
Produção de amidos e farinhas de cereais, mandioca, batatas	Efluentes e restos da produção
Produção de café e chás	Efluentes e biomassas geradas na separação e na filtração
Produção de carne e açougues	Efluentes, sangue, intestinos, carne não comercializável e gordura
Produção de celulose, papéis e cartonagens	Lodo da lixívia verde, lodo de branqueamento, rejeitos e lodos de fibras e outros efluentes da produção
Produção de conservas	Efluentes, resíduos e restos da produção
Produção de laticínios	Soro de leite, lotes estragados e resíduos dos separadores de gordura
Produção de leveduras, doces e outros produtos	Efluentes e resíduos da produção
Produção de óleos e margarinas	Efluentes, torta de filtro de gordura e outros resíduos da produção
Produção de refrigerantes	Efluentes e restos de produção
Produção de sucos e vinhos	Efluentes, lotes estragados e biomassas geradas na filtração
Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU)	Resíduos orgânicos sem contaminantes, separados na fonte, e resíduos orgânicos obtidos após triagem

Fonte: Adaptado de Fundação Estadual do Meio Ambiente (2015).

Apesar da variedade de resíduos que podem ser utilizados para o processo de biodigestão, a realidade é que no Brasil tem-se um número reduzido de resíduos que são empregados para este fim. Os resíduos da suinocultura e da indústria de alimentos e/ou bebidas somam cerca de 70% dos empregados na biodigestão, mostrando que ainda há um grande potencial para a produção de biogás e biometano, considerando apenas os resíduos que já são gerados nos diversos setores da economia brasileira (Kunz et al., 2019).

Resíduos agroindustriais

Para os resíduos agroindustriais, no Brasil, podemos destacar o setor sucroalcooleiro, principalmente pelo alto volume de etanol produzido, somado à quantidade ainda maior de resíduo que é gerado durante o processo, pois para cada litro de etanol produzido gera em média de 10 litros a 15 litros de vinhaça (Fuess et al., 2017; Lebron et al., 2020). Ainda se pode acrescentar a esse volume a quantidade de torta de filtro e a palha, que apresentam características adequadas ao

processo de biodigestão. Embora já existam alguns sistemas de biodigestão utilizando a vinhaça, a produção do biogás a partir deste substrato ainda precisa ser aprimorada visando um maior ganho energético. Estudos mostram o emprego de tecnologias de filtração visando a remoção de água e conseqüentemente a concentração dos materiais orgânicos na fração da vinhaça para a biodigestão (Lebron et al., 2020).

A demanda pelo tratamento de resíduos agroindustriais é intensa, uma vez que normalmente há geração em larga escala desses resíduos. A indústria de laticínios é um exemplo clássico de geração de resíduos líquidos, sobretudo as que processam o leite para a fabricação de queijos, iogurte e leite em pó. Contudo, o tratamento anaeróbico desse material não é muito simples, pois a presença de gorduras do leite dificulta o tratamento. Extraíndo a gordura, as outras características desse resíduo são muito apropriadas para o tratamento anaeróbico e, conseqüentemente, para a produção de biogás. Desse modo, é possível encontrar alguns estudos na literatura mostrando um tratamento com microrganismos específicos como o *Penicillium citrinum* com alta atividade lipásica para viabilizar o aproveitamento desse resíduo para a produção de biogás e biometano (Alves et al., 2019; Ferreira et al., 2021).

Outro exemplo de agroindústria que vem ganhando destaque no tratamento de seus efluentes são os abatedouros, que inicialmente apresenta o mesmo problema com as gorduras que a agroindústria de laticínios. Ainda tem como agravante a alta quantidade de proteína, o que dificulta ainda mais o tratamento anaeróbico, pois a relação carbono/nitrogênio fica muito baixa. Entretanto, para esses problemas existem algumas soluções na literatura, como misturar esses resíduos a outros com uma relação de carbono/nitrogênio alta, por exemplo, resíduos secos de milho (Galván et al., 2021; Otero et al., 2021; Rhee et al., 2021).

Os setores de processamento de alimentos e de produção de bebidas também são grandes potenciais para a produção de biogás e biometano. A partir de seus resíduos, é importante avaliar a composição de cada indústria separadamente e aplicar os devidos tratamentos para obter um processo eficiente.

Resíduos agrícolas

As atividades de pecuária têm despertado uma atenção especial, pois, quando não desenvolvidas de forma correta, podem representar um potencial causador de danos ambientais. Os resíduos da criação de suínos bem como os de criação de bovinos podem contaminar bacias hídricas e muitas vezes são responsáveis pela poluição do ar, uma vez que, se dispostos de forma incorreta, podem gerar o gás metano, que é um dos principais poluidores do ar. Por essas questões e dentro do contexto da economia circular, com a possibilidade de geração de energia a partir desses dejetos, a biodigestão é uma importante solução para os pecuaristas (Yue et al., 2022).

Recentemente foi realizado um estudo do potencial de produção de biogás oriundo das atividades agrícolas utilizando bovinos, suínos, ovinos e aves na China, onde foi calculado que, para o ano de 2017, o potencial de produção de biogás a partir de esterco era por volta de $5,74 \times 10^{12}$ MJ a $6,73 \times 10^{12}$ MJ, equivalente entre 4% e 5% da demanda total de energia da China. Este estudo aponta os ganhos energéticos a partir dos resíduos, que já são bastante significativos, além dos ganhos ambientais resultantes da disposição adequada desses resíduos (Wang et al., 2021). Estudo semelhante realizado na Índia, em que foi calculado o potencial da produção de biogás a partir, somente, dos resíduos agrícolas da criação de bovinos, apresentou um potencial anual de produção de biogás de 265.542 milhões de m^3 (Kaur et al., 2021).

Esgoto sanitário

No contexto dos centros urbanos, o esgoto sanitário é considerado uma das principais fontes de matéria-prima para produção de biogás e biometano. O fato se deve, primeiramente, pelas suas características físicas e químicas, que são bem adequadas ao processo de biodigestão convencional. Além disso, o fato de o esgoto já ser direcionado a um ou poucos locais dentro das cidades facilita a logística do processo. O tratamento do esgoto sanitário através da biodigestão é atrativo por exigir um baixo nível de tecnologia, o que dispensa a necessidade de controles de operação sofisticados. Contudo, a maioria dos sistemas de produção de biogás a partir dos esgotos urbanos não é projetada para a produção de biogás, mas sim para o tratamento do efluente, e nesse caso os processos aeróbicos são os mais empregados. Por esse motivo é muito comum observar o colapso e a morte dos microrganismos. Assim, os estudos relacionados a esse tipo de resíduo são mais voltados para adaptações nos sistemas existentes e melhorias nas condições de operações em variáveis de simples controle, como o pH ou o teor de sólidos, por exemplo (Jamaluddin et al., 2021).

Assim como os resíduos sólidos urbanos, os esgotos sanitários apresentam uma composição muito complexa, por vezes apresentando contaminantes que podem inviabilizar o uso do biogás produzido. Por isso, comumente demandam etapas de purificação mais elaboradas do que as empregadas para o biogás obtido de resíduos de uma única fonte. Um contaminante reconhecidamente prejudicial ao meio ambiente e normalmente produzidos no processo de digestão anaeróbia é o gás sulfídrico (H_2S). Nos processos em que o substrato é o esgoto sanitário, a produção desse gás é um grande problema, desse modo há a necessidade de remoção do H_2S antes do seu uso e, por vezes, os sistemas de remoção convencional são caros ou pouco eficientes, o que leva à busca de novos sistemas (Gasquet et al., 2021).

É importante ressaltar que a maior parte dos esgotos sanitários no Brasil ainda é tratada de forma aeróbia e sem aproveitamento do metano produzido durante o tratamento. Entretanto, a digestão anaeróbia tem sido bastante empregada no tratamento de lodo residual das estações de tratamento de esgoto (Felca et al., 2018). A avaliação do ciclo de vida de dois processos de tratamentos de lodo residual de uma estação de tratamento de esgoto indicou que o impacto ambiental do processo de digestão anaeróbia é menor do que o processo de compostagem, na faixa entre 6,5% e 7,5%, em todos os níveis de efeito ambiental. Esses resultados mostram que a exploração do lodo residual do tratamento de esgoto, para a produção de produtos úteis, como o biogás e seus derivados, confere ao produto final valor ambiental agregado, sem falar do valor econômico associado à utilização ou venda da energia produzida (Morsink-Georgali et al., 2022).

Resíduos sólidos urbanos

Segundo a ABNT, os resíduos sólidos urbanos são aqueles nos estados sólidos ou semissólidos que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. O processo de produção do biogás proveniente desses resíduos sólidos em aterros sanitários é incompleto, pois apenas de 40% a 60% são recuperados. Desse modo, a digestão anaeróbia é vista como uma alternativa atrativa para o tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, com potencial para produção de biogás, biometano e hidrogênio verde, por se tratar de um composto altamente concentrado. Entre as diferentes rotas tecnológicas de digestão anaeróbia, destaca-se a seca, porque aproveita melhor os recursos e suporta maior concentração de sólidos, sendo mais robusta e flexível em comparação com sistemas úmidos.

A determinação da viabilidade do emprego dos resíduos sólidos urbanos demanda um estudo mais específico, do que aqueles que utilizam os resíduos líquidos, sejam eles industriais, rurais ou

urbanos. Além da composição desse resíduo, as variáveis de processo, como temperatura, pH, teor de sólidos totais, substrato para inóculo, proporção, taxa de carga orgânica e tempo de retenção hidráulico/sólidos, também são necessários estudos voltados para o tipo de reator (biodigestor) e muitas vezes o emprego de condições mesofílicas em processos contínuos. Tudo isso é necessário para que se tenha um melhor desempenho do sistema, estabilidade e controle do processo (Franca; Bassin, 2020).

Por se tratar de um processo um pouco mais complexo, a digestão dos resíduos sólidos urbanos ainda não apresenta grandes plantas em operação. Estudos em escala de bancada visam a obtenção de dados para avaliar a produção de CH_4 e CO_2 dos diversos resíduos disponíveis. Resultados mostram que diferentes materiais apresentam diferentes produções de metano, por exemplo, para cascas de batata foi possível obter por volta de 35% de metano, enquanto para o abacaxi somente 0,11% (Romero et al., 2020). Contudo, o processo em larga escala visa o emprego de diferentes substratos simultaneamente. Lee et al. (2019) avaliaram o emprego de diferentes modos de operação nos reatores, diferentes agentes para controle de pH, dentre outros parâmetros. Observaram que o biodigestor operando em regime semicontínuo e a adição de uma mistura de conchas de ostras trituradas e bicarbonato de sódio como fontes de alcalinidade resultaram em rendimentos de metano mais altos, de 183 mL CH_4 /g de sólidos voláteis. É importante salientar que os resíduos sólidos urbanos apresentam uma alta acidez, o que dificulta, sobretudo, o início do processo de biodigestão.

Matérias-primas dedicadas à produção de biogás e biometano

O emprego da digestão anaeróbia para o tratamento de resíduos já é bastante conhecido, e seus benefícios também são notórios, contudo, a demanda por energia e outros produtos de base renováveis aponta que o processo de biodigestão também pode ser utilizado para a produção de energia e outros bioinsumos, independentemente do tratamento de resíduos. O estudo e uso de matérias-primas dedicadas ao processo de biodigestão têm sido cada vez mais crescentes, pois o processo se mostra viável tanto do ponto de vista econômico como energético.

Os desafios para se obter um processo com altas taxas de rendimento e produtividade demandam processos mais sofisticados, pois uma matéria-prima dedicada apresenta em sua composição altos teores de matéria orgânica e alta densidade. Dessa forma, os reatores devem operar em sistemas bem controlados. Estudos para viabilizar o emprego do milho, após a silagem, já estão sendo divulgados e apresentam dados que suportam o emprego de matérias-primas dedicadas para a produção de biogás, biometano e outros insumos (Veluchamy et al., 2019).

É importante lembrar que para o processo de biodigestão com culturas dedicadas os gargalos serão muito semelhantes aos já encontrados em outros processos já enfrentados pela indústria de processamento biológico. A maioria das matérias-primas precisará passar por um processo de pré-tratamento antes de iniciar a biodigestão. Ajustes nas condições de operação, bem como o uso de equipamentos com características atípicas, podem ser requeridos. Nos processos onde o substrato é dedicado para a digestão anaeróbia, a biomassa vegetal é utilizada integralmente. Assim, haverá uma grande quantidade de material lignocelulósico entrando no processo. Entretanto, apesar deste material apresentar um grande potencial para a produção do biogás, ele é recalcitrante para o processo, sendo mandatório um pré-tratamento do substrato (Guan et al., 2022).

No campo de pesquisa, pode-se observar que, além dos estudos voltados para o uso eficiente de matérias-primas dedicadas, também há uma margem para o desenvolvimento de plantas de biodigestão utilizando diferentes resíduos ao mesmo tempo, processo normalmente chamado de codigestão. Para esses sistemas é importante avaliar a proporção de cada resíduo a ser alimentado,

bem como as devidas correções de pH e temperatura, de modo que o sistema consiga operar em equilíbrio no ponto ótimo de produção de metano (mu et al., 2020).

Utilização de biogás e biometano

Apesar da participação do biogás no mercado mundial de energia ser limitada, o biogás tem grande potencial para desempenhar o papel de solução multifuncional, com utilização versátil em diversos setores, como produção de calor e vapor, geração de eletricidade e combustível veicular, após etapas de purificação. Além disso, o biogás também pode ser utilizado na produção de outros produtos químicos, como metanol, hidrogênio, gasolina, diesel, amônia, dentre outros.

O biogás é um combustível multifacetado com uma infinidade de opções de utilização. Tradicionalmente, a rota mais comum e acessível de utilização direta do biogás é em queimadores simples e iluminação. É uma tecnologia estabelecida, de baixo custo e de baixa manutenção. Geralmente, é de uso doméstico em áreas rurais de países em desenvolvimento, como o melhor meio de exploração do biogás. O CH₄ é um gás combustível responsável pelas propriedades energéticas do biogás, enquanto o CO₂, que não sofre combustão, reduz o poder calorífico e limita a transportabilidade do biogás, pois não pode ser injetado em gasodutos de gás natural. Outros constituintes do biogás, como sulfeto de hidrogênio, vapor de água e siloxanos, causam a corrosão das peças metálicas e a diminuição do poder calorífico. Por isso, é importante separar o CO₂ e outros constituintes corrosivos para potencializar e ampliar a utilização do biogás. A remoção de CO₂ gera o biometano, aumentando o poder calorífico para valores de até 35,8 MJ/m³ (Kapoor et al., 2020). Em resumo, o biogás pode ser utilizado sem nenhuma purificação para cozimento e iluminação e pode passar por uma limpeza para retirada de umidade e outros gases em pequena concentração, como o H₂S, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica. Além disso, o CO₂ pode ser removido, gerando biometano utilizado como combustível veicular, e, por último, pode passar por processos químicos, gerando gás de síntese, hidrogênio, metanol, hidrocarbonetos, dentre outros. A seguir, os principais usos do biogás serão descritos com mais detalhes.

Energia térmica e elétrica

Processos de combustão são usados para geração de energia térmica e elétrica a partir do biogás. A combustão do biogás em caldeiras fornece energia térmica, principalmente para processos industriais. Já a combustão do biogás em turbinas ou em motores de combustão interna é usada para geração de energia elétrica (Khan et al., 2017; Pobleto, 2019).

O uso de biogás como combustível em caldeiras é uma excelente opção para produção de energia térmica. É uma aplicação do biogás baseada em tecnologia convencional e viável, na qual vapor de água é obtido a partir do calor liberado na combustão do biogás, e o vapor é usado como energia térmica, em processos industriais (Kapoor et al., 2020).

Entretanto, o biogás possui elevados teores de dióxido de carbono (CO₂), o que resulta em baixo poder calorífico, entre 20 e 23 MJ/m³, inferior ao do gás natural comercial (31-39 MJ/m³). Por isso, caldeiras que usam gás natural precisam ser adaptadas para o emprego de biogás como combustível, necessitando de ajuste da razão combustível:ar e aumento do orifício de combustível. A remoção de sulfeto de hidrogênio (H₂S) é recomendada para evitar problemas de corrosão no equipamento e emissão de óxidos de enxofre, que causam danos ambientais (Kaparaju; Rintala, 2013; Kapoor et al., 2020).

A energia elétrica pode ser obtida a partir do biogás por diferentes tecnologias, como motores de combustão interna, turbinas a gás, microturbinas, e células a combustível (Khan et al., 2017). Na Alemanha, no ano de 2016, a geração de energia elétrica usando biogás como combustível correspondeu a 74% da geração de energia elétrica proveniente da biomassa (Daniel-Gromke et al., 2018).

A geração de energia elétrica usando motores de combustão interna (MCI) acoplados a geradores de energia elétrica tem sido muito aplicada ao biogás (Souza et al., 2004). Essa configuração vem sendo a tecnologia mais difundida dentre as máquinas térmicas, em razão da sua simplicidade e robustez, aplicada a pequenas e médias demandas elétricas, de centenas de kW até dezenas de MW. Os MCI são divididos em motores de ignição por centelha ou de ciclo Otto, e motores de ignição por compressão, ou de ciclo Diesel. Nos motores de ciclo Otto, a ignição da mistura ar-combustível é obtida por centelha proveniente do sistema elétrico, enquanto nos motores de ciclo Diesel, a ignição da mistura ar-combustível ocorre pela sua compressão e consequente aumento de temperatura (Salomon, 2007).

A eficiência elétrica dos motores de ciclo Otto (ignição por centelha) depende do tamanho, variando entre 18% e 43%. Esses motores necessitam de biogás com teor de metano mínimo de 45% e remoção de H₂S, umidade e siloxanos (Ozorio, 2018; Kapoor et al., 2020).

Os motores de ciclo Diesel quando operados com biogás necessitam de uma pequena quantidade de diesel para ignição. Assim, o diesel é injetado como combustível-piloto, permitindo que ocorra a combustão do biogás. Outros combustíveis com a mesma temperatura de ignição podem ser usados como combustível-piloto (Mustafi et al., 2013; Mohanty et al., 2013 citados por Baggio, 2017).

As turbinas a gás de média e grande capacidade também podem ser empregadas para geração de energia elétrica a partir do biogás. Compressor, câmara de combustão e a turbina são os principais componentes das turbinas a gás. O biogás é alimentado na câmara de combustão, que sofre combustão com ar comprimido fornecido pelo compressor, e os gases de exaustão acionam a turbina. A turbina propuliona o gerador e o compressor. Após a passagem pela turbina, os gases de exaustão ainda estão em temperatura elevada (400 °C - 600 °C), sendo que essa energia térmica pode ser aproveitada em turbinas a vapor ou aquecimento (Deublein; Steinhauser, 2008).

As microturbinas são turbinas a gás pequenas, operando em alta rotação e baixa temperatura e pressão de combustão. Possuem potência elétrica de até 200 kW (Deublein; Steinhauser, 2008; Ozorio, 2018).

A cogeração, que é a produção combinada de energia térmica e energia elétrica (*Combined heat and power* (CHP)), também é aplicada ao biogás, com a finalidade de geração de energia elétrica e recuperação de calor do motor e dos gases de exaustão. Na Alemanha, os sistemas de cogeração são os mais utilizados, com a eletricidade gerada introduzida na rede elétrica nacional e o calor consumido nas redes de aquecimento distritais, além de outros usos (Pöschl et al., 2010; Kaparaju; Rintala, 2013; Daniel-Gromke et al., 2018).

A eficiência energética dos sistemas de cogeração depende do seu tamanho. A eficiência na geração de energia elétrica a partir de biogás em sistemas de cogeração de pequena escala é em torno de 33%, enquanto em sistemas maiores (> 0,7 MW) a eficiência é de 40%. Em relação à eficiência na geração de energia térmica, nos sistemas de cogeração de pequena escala é de 50%, e nos sistemas maiores é de 48%. Assim, a eficiência energética total (elétrica + térmica) nos sistemas de cogeração varia entre 83% e 88% (Pöschl et al., 2010).

Células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química do combustível em energia elétrica. As células a combustível são classificadas com base nos eletrólitos usados e, conseqüentemente, pela temperatura de operação. Células a combustível de baixa temperatura (60 °C – 250 °C) são as seguintes: alcalina (*Alkaline fuel cell* (AFC)), membrana de troca de prótons (*Proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC)), ácido fosfórico (*Phosphoric acid fuel cell* (PAFC)). As células a combustível de alta temperatura (800 °C – 1.000 °C) incluem a carbonato fundido (*Molten carbonate fuel cell* (MCFC)) e a óxido sólido (*Solid oxide fuel cell* (SOFC)) (Allegue; Hinge, 2012 citados por Kapoor et al., 2020). Para conversão de biogás em eletricidade, a célula a combustível de óxido sólido (SOFC) é a mais promissora, pois apresenta escalabilidade para plantas de digestão anaeróbia, possui tolerância a carbono, e por causa da alta temperatura de operação e da presença de um catalisador no ânodo, o metano pode sofrer reforma diretamente na célula, gerando hidrogênio (Baldinelli et al., 2017).

Biometano

De acordo com a Resolução ANP nº 8/2015, biometano é o “biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás”. A mesma resolução estabelece a especificação do biometano obtido de produtos e resíduos agrossilvopastoris e comerciais, o qual deve conter um teor mínimo de metano de 90,0% mol., teor máximo de CO₂ de 3,0% mol. e teor máximo de sulfeto de hidrogênio (H₂S) de 10 mg/m³ (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2015).

Para obtenção do biometano, além da remoção de impurezas, ou seja, compostos prejudiciais ou tóxicos (H₂S, NH₃, CO e outros), o biogás precisa passar por um tratamento chamado de *biogas upgrading*, ou aprimoramento do biogás, que tem por finalidade o aumento do poder calorífico do biogás transformando-o em combustível com especificações próximas às do gás natural. Assim, nesse tratamento de aprimoramento do biogás, o dióxido de carbono (CO₂) precisa ser removido. Dentre as tecnologias de aprimoramento do biogás, existem cinco disponíveis em escala comercial: absorção física em água, absorção física em solventes orgânicos, absorção química usando solução de amina, processo PSA (*Pressure swing adsorption*) e separação por membranas. Métodos biológicos de aprimoramento do biogás estão em desenvolvimento (Angelidaki et al., 2018).

O biometano pode ser usado como combustível veicular. Uma avaliação de ciclo de vida do uso de biometano comprimido como combustível de ônibus em Mumbai, na Índia, indicou que o biometano comprimido pode reduzir a emissão de gases do efeito estufa e material particulado em torno de 60%, comparado com o diesel ou gás natural comprimido (Shanmugam et al., 2019).

Outro uso do biometano é a injeção em rede de gás natural. Países como Suécia, Alemanha, Suíça e França possuem normas para injeção de biogás nas redes de gás natural, para evitar danos em equipamentos (Ahmed et al., 2021).

Produtos químicos e combustíveis líquidos

O biogás também pode ser usado para produção de produtos químicos e combustíveis líquidos. Uma rota usada para este propósito é baseada na reforma de biogás, que resulta em gás de síntese (*synthesis gas - syngas*), que é uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio. Diferentes produtos podem ser obtidos a partir do gás de síntese, como metanol, dimetil éter, hidrocarbonetos líquidos, hidrogênio e produtos derivados, como amônia (Yang et al., 2014; Hernandez; Martin, 2018; Chouhan et al., 2021).

Existem diferentes processos de reforma de metano que podem ser aplicados ao biogás: reforma a vapor, reforma seca, reforma autotérmica e combinação de dois ou três processos, chamados de birreforma ou trirreforma (Hernandez; Martin, 2018; Entesari et al., 2020; Zhao et al., 2020). A razão hidrogênio:monóxido de carbono ($H_2:CO$) do gás de síntese varia nos diferentes processos de reforma, sendo maior na reforma a vapor ($H_2:CO$ em torno de 3) e menor na reforma seca ($H_2:CO$ em torno de 1) (Park et al., 2020; Zhao et al., 2020).

Assim, para obtenção de hidrogênio a partir de biogás, um processo baseado em reforma a vapor é o mais indicado. Entretanto, para outros produtos, como metanol, um processo que obtenha um gás de síntese com razão $H_2:CO$ próxima de 2 é o mais indicado, o que pode ser obtido pela birreforma de biogás, baseada na combinação de reforma a vapor e reforma seca (Minh et al., 2018; Entesari et al., 2020).

Em geral, os processos de reforma utilizam altas temperaturas (acima de 700 °C) e catalisadores à base de níquel. Entretanto, os catalisadores à base de níquel apresentam limitações, como a deposição de carbono. Por isso, promotores que limitam a deposição de carbono são adicionados na composição do catalisador (Zhao et al., 2020).

O dióxido de carbono do biogás, após separação dos demais componentes do biogás, também pode ser usado para produção de compostos químicos, por exemplo, a produção de ureia (Baena-Moreno et al., 2020a). Outro composto químico que pode ser obtido do CO_2 é formaldeído (Baena-Moreno et al., 2020b).

Contribuições do biogás para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Os biocombustíveis têm um papel de extrema relevância na agenda do Brasil para o alcance de metas em vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) assumidos pelo País na COP21, em 2015, e reafirmados na COP26. A seguir, são relacionados os ODS com os quais o biogás tem aderência e suas contribuições.

ODS 2. Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável

Embora o ODS 2 seja bastante audacioso quando fala de acabar com a fome, ele também aborda segurança alimentar, melhoria da nutrição e a promoção da agricultura sustentável. Os resíduos rurais, que possuem grande potencial de provocar poluição ambiental, como os dejetos animais, quando passam por tratamento por digestão anaeróbia contribuem para que a agricultura brasileira seja mais sustentável. O biogás produzido pela digestão anaeróbia desses resíduos pode ser usado para fins energéticos nas propriedades rurais, diminuindo o consumo de combustíveis fósseis. Além disso, o digestato obtido pode ser usado como fertilizante, diminuindo o uso de fertilizantes convencionais, e disponibilizando uma alternativa barata para pequenos produtores rurais e aumentando a produtividade nessas propriedades. Assim, além de diminuir a poluição ambiental, pelo tratamento de resíduos rurais por digestão anaeróbia, o uso dos produtos do processo, biogás e digestato, contribui para diminuição do uso de combustíveis fósseis e para o aumento da produtividade na agricultura brasileira.

ODS 3. Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades

Ter uma vida saudável contempla fatores além dos cuidados pessoais, mas que estão estritamente relacionados, como é o caso dos cuidados com o meio ambiente.

Considerando que o biogás pode ser produzido a partir de diversos tipos de materiais residuais, poluidores do meio ambiente, a digestão anaeróbia se apresenta como uma ferramenta extremamente relevante, para amenizar o impacto causado por resíduos de diversas fontes.

Um importante exemplo da utilização da biodigestão para geração de energia e aproveitamento de resíduos são os provenientes da produção de etanol, que gera de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido. Tanto a vinhaça quanto a torta de filtro do processo vêm sendo empregadas na biodigestão, sem contar a palha da cana, com potencial de uso. De acordo com dados da União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA), na safra 2021/2022, foram produzidos 26,88 bilhões de litros de etanol (Novacana, 2022).

A Associação Brasileira do Biogás (Abiogás, 2022b) atribuiu ao uso do biometano uma melhoria de qualidade de vida nas cidades, dado que ele impacta de forma positiva na qualidade do ar, enquanto a correta disposição dos resíduos urbanos e rurais impacta nas condições sanitárias da população.

ODS 7. Garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos

Em 2018, a produção mundial de biogás e biometano foram por volta de 35 Mtep, de acordo com a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* (IEA)). Estima-se que a plena utilização do potencial sustentável pode cobrir cerca de 20% da demanda mundial de gás atual (International Energy Agency, 2020). No caso do Brasil, em 2020, o País possuía 638 plantas de biogás em operação com capacidade instalada de 2,22 bilhões Nm³/ano (Biogasdata, 2021). O maior volume de biogás produzido no Brasil (86% do total) é utilizado na geração de energia elétrica (Milanez et al., 2021).

Alguns países publicaram decretos para aumentar o uso de biometano como solução de descarbonização. Na Suécia, aproximadamente metade do biogás produzido é usado como combustível veicular. Outros países, como Alemanha, Holanda, Dinamarca e Coreia do Sul, também passaram a usar o biometano como combustível automotivo (Golmakani et al., 2022). No setor de transportes, uso do biometano pode contribuir com uma parcela importante dos combustíveis renováveis.

Um ponto importante a ser mencionado sobre a produção de biogás é a matéria-prima utilizada. Existe uma diversidade muito grande de substratos ou matérias-primas que podem ser consideradas como passivos ambientais, como é o caso dos resíduos da agropecuária, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos e efluentes utilizados na produção de biogás. Grande parte desses resíduos subutilizados pode ser mapeada e empregada na geração de energia, com grande impacto na geração de energia, que pode dessa forma ter seu custo de geração reduzido.

Assim, a exploração desse potencial trará expansão na geração de energia, juntamente com outras matérias-primas dedicadas à produção, sendo uma forma de energia renovável, sustentável e barata para que todos tenham acesso, estando, portanto, alinhada ao ODS 7.

ODS 8. Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos.

O setor de energia desempenha papel fundamental para o crescimento econômico do País e para a qualidade de vida da população. A diversificação da matriz energética é apontada como um dos caminhos estratégicos para garantir o desenvolvimento socioeconômico do País.

Segundo os analistas do BEP (Programa de Energia para o Brasil), o potencial total de biogás no Brasil é de 10,9 bilhões Nm³/ano, equivalente à produção de 22,9 TWh/ano ou quase 5% do consumo nacional de energia elétrica. O setor sucroenergético é responsável por 7,2 bilhões Nm³/ano desse potencial (66%), considerando o aproveitamento da vinhaça e da torta de filtro para a produção de biogás (Unica, 2021).

Nesse cenário, o biogás se apresenta como uma solução promissora no conceito de bioeconomia e economia circular. O fato de poder gerar energia a partir do que poderia ser um passivo ambiental é particularmente interessante, por se ter uma matéria-prima a baixo custo e ainda com forte apelo ambiental. Pensando na questão de ampliar investimentos e elevar a produção do biogás e bioprodutos, ainda podem ser utilizadas biomassas dedicadas para o processo de biodigestão. Esses fatores combinados resultam em produtos sustentáveis, que podem ser gerados em diversas regiões do País. O potencial do emprego da produção e utilização do biogás pode ser traduzido em desenvolvimento regional, maior empregabilidade e renda.

No que se refere a empregos, a Associação Brasileira do Biogás (Abiogás, 2022b) reporta que são gerados cerca de sete empregos para cada 1 MW de potência instalada para produção de biogás. Além disso, há um potencial de produção de biogás no Brasil para sustentar cerca 35% da energia elétrica ou substituir 70% do diesel consumido no País.

Considerando apenas o biometano, seu papel pode ser fundamental na economia, uma vez que se coloca ao lado do etanol e do biodiesel, como uma opção de biocombustível para o transporte rodoviário, podendo contribuir de forma significativa para reduzir seus custos e aumentar a competitividade da produção nacional, principalmente em cenários de alta do petróleo.

ODS 11. Cidades e comunidades sustentáveis

Atualmente, metade da população mundial, 3,5 bilhões de pessoas, vive em cidades, e a projeção é que cerca de 5 bilhões de pessoas irão viver em cidades em 2030. As cidades ocupam apenas 3% das terras do planeta, mas são responsáveis por 60% a 80% do consumo de energia e por 75% das emissões de carbono. O crescimento acelerado da urbanização exerce pressão sobre o fornecimento de água potável, tratamento de esgoto e resíduos, meio ambiente e saúde pública (United Nations, 2022).

No Brasil, 84,72% da população vive em áreas urbanas (IBGE, 2022). Além disso, as cidades e comunidades brasileiras possuem vários problemas ambientais, de saneamento básico e sanitário, como os baixos índices de coleta e tratamento de esgoto (Abiogás, 2021b). Adicionalmente, quase metade dos municípios não dispõem adequadamente seus resíduos, incluindo resíduos orgânicos (Agência Brasil, 2020).

A discussão sobre modelos de cidades sustentáveis deve considerar não só o aspecto socioeconômico, mas também ambiental. A combinação desses fatores deve gerar ganhos como a redução das emissões de carbono e a degradação dos ecossistemas. As diferentes soluções pensadas nessa lógica entregam como resultado o ganho econômico, a inclusão social e a preservação ambiental.

Dessa forma, a necessidade de cidades e comunidades sustentáveis é de grande importância para a qualidade de vida da população. No caso do Brasil, o tratamento de esgoto e resíduos orgânicos por processos anaeróbios é uma forma de tratar esses materiais de forma adequada, além do aproveitamento do biogás gerado para produção de energia elétrica, térmica e biocombustível. A implantação de toda essa cadeia resulta na geração de emprego e renda, e na redução das emissões de gases de efeito estufa.

A Associação Brasileira do Biogás (ABIOGÁS), com colaboração de outras instituições, avaliou o potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto. Para o ano de 2033, foi estimado um potencial de produção de biogás entre 715,7 e 934,8 milhões de Nm³/ano, variação resultante dos diferentes níveis de adoção de rotas de anaeróbias nas estações de tratamento de esgoto no País. No cenário mais otimista, em 2033, o aproveitamento do biogás resultaria na geração de 2,2 milhões de MWh de energia elétrica ou 2,53 milhões de MWh de energia térmica ou, ainda, o equivalente a 652,5 milhões de litros de diesel (Abiogás, 202b).

Esse modelo de comunidade sustentável baseado na produção de biogás a partir de esgoto e resíduos orgânicos pode ser aplicado a comunidades com diferentes realidades, em termos de volume e tipo de substrato disponível. Assim, a biodigestão, incluindo a produção e o uso de biogás, apresenta-se como uma ferramenta para fechar os ciclos de produção e consumo, principalmente das cidades.

ODS 13. Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos

É sabido que o tão citado aquecimento global e as mudanças climáticas estão diretamente relacionados ao desenvolvimento industrial, crescimento de bens de consumo e à forte dependência de fontes fósseis. Também é de amplo conhecimento que para frear o fenômeno das mudanças climáticas é necessário adotar e ampliar práticas de descarbonização. No entanto, para migrar para uma economia de baixo carbono, é necessária a mudança de paradigmas e até de modelos de negócios.

No que diz respeito à substituição de fontes fósseis por renováveis, o Brasil tem tido um relevante papel. O País dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica, que é de 65,2% da oferta interna, enquanto o biogás vem crescendo e já alcança 8,3%. E as fontes renováveis, resultantes da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, representam 84,8% da oferta interna de eletricidade (Empresa de Pesquisa Energética, 2022). Um exemplo de fonte renovável em ascensão no País, que certamente terá importante papel na matriz energética, é o biogás. Segundo a ABiogás, o biogás tem potencial para fornecer 34,5% da demanda de energia elétrica do Brasil, que é de 482TWh (Abiogás, 2022b).

Projetos da Embrapa Agroenergia relacionados com biogás

A seguir, serão relacionados alguns projetos desenvolvidos na Embrapa Agroenergia, no tema de biogás, com suas contribuições dentro das metas dos ODS.

Projeto: Aproveitamento de dejetos bovinos em sistemas de biodigestão em propriedades de pequenos produtores na região de Luziânia-GO

Objetivo geral do projeto: Propiciar ganhos sócio-econômico-ambientais a pequenos produtores rurais da região de Luziânia, empregando o processo de biodigestão para aproveitamento de dejetos bovinos na geração de energia.

Contribuição nas metas dos ODS:

ODS 2, meta 4 - Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo. Justificativa: disposição adequada dos dejetos bovinos e uso do digestato como fertilizante.

ODS 7, meta 2 - Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global. Justificativa: uso do biogás para fins energéticos.

ODS 13, meta 3 - Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima. Justificativa: reduzir impacto ambiental negativo provocado por emissões de dióxido de carbono.

Projeto: Integração de processos na cadeia produtiva do biogás utilizando resíduos de hortifrúti e efluentes da cultura do dendê como substrato

Objetivo geral do projeto: Desenvolver um pacote tecnológico para produção de biogás e gás de síntese utilizando resíduos de hortifrúti e efluentes da cultura do dendê, como substratos.

Contribuição nas metas dos ODS:

ODS 3, meta 9 - Reduzir número de mortes e doenças por contaminação e poluição do ar e água do solo. Justificativa: incentivar e melhorar a disposição de resíduos de hortifrúti e o tratamento de efluentes.

ODS 7, meta 2 - Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global. Justificativa: uso do biogás para fins energéticos.

ODS 9, meta 4 - Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades. Justificativa: tornar a indústria de dendê mais sustentável pela utilização de seus resíduos.

ODS 11, meta 6 - Até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros. Justificativa: melhorar a gestão dos resíduos de hortifrúti.

Projeto: Produção sustentável de biogás, biometano e biofertilizantes com o uso inteligente de biomassas, resíduos e efluentes do agronegócio brasileiro.

Objetivo geral do projeto: Desenvolver o processo de biodigestão aplicado a culturas dedicadas e seus resíduos, e de resíduos da cadeia de consumo urbana, focado na otimização de produção do biogás, para fins energéticos, e da caracterização do digestato, como fertilizante. Assim como desenvolver processos de conversão de biogás em produtos de valor agregado e o digestato para produção de bioinsumos.

Contribuição nas metas dos ODS:

ODS 2, meta 4 - Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo. Justificativa: uso do digestato como fertilizante.

ODS 7, meta 7 - Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global. Justificativa: uso do biogás para fins energéticos.

Projeto: Efeito da adição de gadolínio e praseodímio em óxidos mistos de Ni-Mg-Al aplicados na reforma a vapor de biogás

Objetivo geral do projeto: Produzir catalisadores e otimizar processos de reforma de biogás.

Contribuição nas metas dos ODS:

ODS 9, meta 4 - Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades. Justificativa: o uso do gás de síntese obtido da reforma de biogás para produção de hidrogênio pode tornar muitos setores industriais, que usam hidrogênio, mais sustentáveis.

Projeto: Obtenção de biogás e etanol de segunda geração a partir de correntes dos processos de auto-hidrólise e organosolv de bagaço de cana-de-açúcar.

Objetivo geral do projeto: Obter biogás e etanol de segunda geração a partir de correntes resultantes dos processos de auto-hidrólise e organosolv de bagaço de cana-de-açúcar.

Contribuição nas metas dos ODS:

ODS 7, meta 2 - Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global. Justificativa: uso do biogás para fins energéticos.

- Atividades em projetos

Plano de Ação: Adaptação do processo para produção de hidrogênio a partir de biogás

Objetivo: avaliar os principais processos para produção de hidrogênio a partir do biogás, reforma a vapor e reforma com dióxido de carbono, identificar e avaliar catalisadores para esses processos, definir condições operacionais em condições de laboratório e configurar o processo de produção.

Contribuição nas metas dos ODS:

ODS 9, meta 4 - Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades. Justificativa: o uso do gás de síntese obtido da reforma de biogás para produção de hidrogênio pode tornar muitos setores industriais, que usam hidrogênio, mais sustentáveis.

Considerações finais

A produção de biogás vem crescendo no Brasil nos últimos anos, pois o processo de digestão anaeróbia permite, além do uso e tratamento de efluentes agroindustriais e dejetos animais, a obtenção do biocombustível para fins energéticos.

Diferentes reatores têm sido usados no Brasil, como os biodigestores indianos e chineses em pequenas propriedades rurais, além dos biodigestores de lagoa coberta e de mistura completa (CSTR). Os reatores UASB são muito empregados no tratamento de efluentes agroindustriais.

Dentre as matérias-primas para produção de biogás, o Brasil dispõe de resíduos e efluentes agroindustriais, como a vinhaça produzida pelo setor sucroalcooleiro, resíduos rurais, como os dejetos animais, esgoto sanitário e resíduos sólidos urbanos. O uso de matérias-primas dedicadas para a produção de biogás e biometano ainda se encontra em desenvolvimento no País, apresentando alguns gargalos, como a necessidade de pré-tratamento.

A principal utilização do biogás é na produção de energia térmica e elétrica. O biometano obtido por processos de purificação e aprimoramento (*upgrading*) do biogás pode ser usado como combustível veicular ou injetado em redes de gás natural. Produtos químicos e combustíveis líquidos também podem ser produzidos a partir do biogás, sendo a reforma de biogás bastante pesquisada para esta finalidade, da qual podem ser obtidos metanol, dimetil éter, hidrocarbonetos líquidos, hidrogênio e produtos derivados, como amônia.

O uso do biogás também pode contribuir para o Brasil cumprir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 das Nações Unidas. Os principais ODS nos quais o biogás possui potencial para contribuir são os ODS 2, 3, 7, 8, 11 e 13. O ODS 2 está relacionado com agricultura sustentável. A produção de biogás a partir de resíduos rurais, pelo processo de biodigestão, diminui o impacto ambiental desses resíduos, além de permitir o uso do biogás e digestato na propriedade rural, diminuindo o consumo de insumos agrícolas obtidos a partir de combustíveis fósseis. A produção de biogás a partir de esgoto doméstico e resíduos sólidos urbanos pode contribuir com o ODS 3, assegurando uma vida saudável e o bem-estar da população pelo tratamento adequado destes resíduos. O uso do biogás tem potencial para diminuir os custos com energia, além de ser uma fonte de energia produzida localmente, sustentável e renovável, contribuindo para o alcance do ODS 7. O biogás possui potencial para promover o crescimento econômico sustentável, diminuindo o uso de combustíveis fósseis, que não são produzidos em vários estados brasileiros, além de contribuir para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva incipiente no País, o que está diretamente relacionado com o ODS 8. Como a produção de biogás é realizada localmente, nas comunidades e cidades, o uso do biogás contribui para o alcance do ODS 11, tornando essas comunidades e cidades mais sustentáveis e menos dependentes de combustíveis provenientes de outras regiões. Por último, o ODS 13 está relacionado com as mudanças climáticas, e o biogás, sendo um biocombustível, contribui para diminuir o consumo de combustíveis fósseis, diminuindo as emissões de gases do efeito estufa, que causam as mudanças climáticas. Assim, o biogás pode contribuir para o alcance de diversos ODS, sendo muitos deles relacionados com sustentabilidade, geração de energia e mudanças climáticas.

Referências

ABIOGÁS. **Abiogás divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro durante fórum em São Paulo.** Disponível em: <https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>. Acesso em: 15 jun. 2022a.

ABIOGÁS. **PNBB Programa Nacional do Biogás e Biometano**. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2022/01/PNBB.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2022b.

AGÊNCIA BRASIL. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2020-12/destinacao-inadequada-de-lixo-cresce-16-em-uma-decada>. Acesso em: 15 ago. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP nº 8, de 30 de janeiro de 2015. Estabelece a especificação do biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução. **Diário Oficial da União**, 2 fev. 2015. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=280722>. Acesso em: 15 ago. 2022.

AHMED, S. F.; MOFIJUR, M.; TARANNUM, K.; CHOWDHURY, A. T.; RAFA, N.; NUZHAT, S.; KUMAR, P. S.; VO, D.-V. N.; LICHTFOUSE, E.; MAHLIA, T. M. I. Biogas upgrading, economy and utilization: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 6, p. 4137-4164, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01292-x>.

ALVES, A. M.; MOURA, R. B. de; CARVLHO, A. K. F.; CASTRO, H. F. de; ANDRADE, G. S. S. *Penicillium citrinum* whole-cells catalyst for the treatment of lipid-rich wastewater. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 433-438, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.12.004>.

ANGELIDAKI, I.; TREUA, L.; TSAPEKOSA, P.; LUOC, G.; CAMPANARO S.; WENZEL, H.; KOUGIASA, P. G. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>.

AVARGANI, V. M.; ZENDEHBOUDI, S.; CATA SAADY, N. M.; DUSSEAU, M. B. A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: prospects and challenges. **Energy Conversion and Management**, v. 269, n. 115927, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115927>.

BAENA-MORENO, F. M.; PASTOR-PÉREZ, L.; ZANG, Z.; REINA, T. R. Stepping towards a low-carbon economy. Formic acid from biogas as case of study. **Applied Energy**, v. 268, p. 115033, 15 jun. 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115033>.

BAENA-MORENO, F. M.; SEBASTIA-SAEZ, D.; WANG, Q.; REINA, T. R. Is the production of biofuels and biochemicals always profitable? Co-production of biomethane and urea from biogas as case study. **Energy Conversion and Management**, v. 220, n. 113058, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113058>.

BAGGIO, P. L. **Estudo das tecnologias existentes para geração de energia elétrica a partir do biogás**. 2017. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, Pato Branco.

BALDINELLI, A.; BARELLI, L.; BIDINI, G. Upgrading versus reforming: an energy and exergy analysis of two solid oxide fuel cell-based systems for a convenient biogas-to-electricity conversion. **Energy Conversion and Management**, v. 138, p. 360-374, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.002>.

BIOGASDATA. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjQxYjg4NjgtMTI0NC00NTk2LTk5OTQtMjFkNmMxZTk5liwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9>. Acesso em: 4 mar. 2022.

CATA SAADY, N. M.; MASSÉ, I. High rate psychrophilic anaerobic digestion of high solids (35%) dairy manure in sequence batch reactor. **Bioresource Technology**, v. 186, p. 74-80, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.038>.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Anaerobic reactors**. London: IWA Publishing, 2007.

CHOUHAN, K.; SHISHIR, S.; KUMAR, S.; KUMAR, S. Simulation of steam reforming of biogas in an industrial reformer for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 53, p. 26809-26824, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.152>.

DANIEL GROMKE, J.; RENSBERG, N.; DENYSENKO, V.; STINNER, W.; SCHMALFUß, T.; SCHEFTELOWITZ, M.; NELLES, M.; LIEBETRAU, J. Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 90, n. 1-2, p. 17-35, Jan./Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201700077>.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. (ed.). **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. John Wiley & Sons, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527621705>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional: relatório síntese 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 15 jun. 2022.

ENTESARI, N.; GOEPPERT, A.; SURA PRAKASH, G. K. Renewable methanol synthesis through single step Bi-reforming of biogas. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 22, p. 10542-10551, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00755>.

FELCA, A. T. A.; BARROS, L. B.; TIAGO FILHO, G. L.; SANTOS, I. F. S. dos; RIBEIRO, E. M. Analysis of biogas produced by the anaerobic digestion of sludge generated at wastewater treatment plants in the South of Minas Gerais, Brazil as a potential energy source. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 139-153, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.035>.

FERREIRA, T. F.; SANTOS, P. A.; PAULA, A. V.; CASTRO, H. F. de; ANDRADE, G. S.S. Biogas generation by hybrid treatment of dairy wastewater with lipolytic whole cell preparations and anaerobic sludge. **Biochemical Engineering Journal**, v. 169, n. 107965, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.107965>.

FRANCA, L. S.; BASSIN, J. P. The role of dry anaerobic digestion in the treatment of the organic fraction of municipal solid waste: a systematic review. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, n. 105866, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105866>.

FUESS, L. T.; ARAÚJO JÚNIOR, M. M. de; GARCIA, M. L.; ZAIAT, M. Designing full-scale biodigestion plants for the treatment of vinasse in sugarcane biorefineries: how phase separation and alkalization impact biogas and electricity production costs? **Chemical Engineering Research and Design**, v. 119, p. 209-220, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.023>.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria**. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/2015/PRODUCAO_SUSATENTAVEL/GUIAS-TECNICOS-AMBIENTAIS/Guia_Biog%C3%A1s.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

GALVÁN, M. J.; DEGANO, S.; CAGNOLO, M.; BECKER, A.; HILBERT, J.; FUENTES, M.; ACEVEDO, D. Batch optimization of biogas yield from pasteurized slaughterhouse by-products incorporating residues from corn sieving. **Biomass and Bioenergy**, v. 151, 106136, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106136>.

Gasquet, V.; Kim, B.; Bonhomme, A.; Benbelkacem, H. Sewage sludge ash-derived materials for H₂S removal from a landfill biogas. **Waste Management**, v. 136, p.230-237, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.023>.

GOLMAKANI, A.; NABAVI, S. A.; WADI, B.; MANOVIC, V. Advances, challenges, and perspectives of biogas cleaning, upgrading, and utilisation. **Fuel**, v. 317, n. 123085, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123085>.

GUAN, R.; YUAN, H.; YUAN, S.; YAN, B.; ZUO, X.; CHEN, X.; LI, X. Current development and perspectives of anaerobic bioconversion of crop stalks to Biogas: a review, **Bioresource Technology**, v. 349, n. 126615, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126615>.

HERNANDEZ, B.; MARTIN, M. Optimization for biogas to chemicals via tri-reforming. Analysis of Fischer-Tropsch fuels from biogas. **Energy conversion and management**, v. 174, p. 998-1013, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.074>.

IBGE. **Conheça o Brasil – população**: população rural e urbana. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em: 2 ago. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Outlook for biogas and biomethane**: prospects for organic growth: world energy outlook special report. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>. Acesso em: 4 mar. 2022.

JAMALUDDIN, M. F.; ZAINOL, N.; SHARIF, N. S. A. M. Troubleshooting on biogas production by using factorial analysis in sewage treatment plant (STP). **Materials today**: proceedings, v. 46, part 4, p. 1755-1762, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.571>.

KAPARAJU, P.; RINTALA, J. Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells. In: WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BASTER, D. (ed.). **The biogas handbook**. [Oxford]: Woodhead Publishing, 2013. p. 404-427. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.404>.

KAPOOR, R. ; GHOSH, P.; TYAGI, B.; VIJAY, V. K.; VIJAY, V.; THAKUR, I. S.; KAMYAB, H.; NGUYEN, D. D.; KUMAR, A. Advances in biogas valorization and utilization systems: a comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123052, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123052>.

KAUR, G.; SHARMA, N. K.; KAUR, J.; BAJAJ, M.; ZAWBAA, H. M.; TURKY, R. A.; KAMEI, S. Prospects of biogas and evaluation of unseen livestock based resource potential as distributed generation in India. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 13, n. 4, n. 101657, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101657>.

- KHAN, I. U.; OTHMAN, M. H. D.; HASHIMA, H.; MATSUURA, T.; ISMAIL, A. F.; REZAEI-DASHTARZHANDEBI, M.; AZELEE, W. Biogas as a renewable energy fuel: a review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy Conversion and Management**, v. 150, n. 15, p. 277-294, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>.
- KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. (ed.). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2019.
- Lebron, Y.A.R.; Moreira, V.R.; Furtado, T.P.B.; Silva, S.C.; Lange, L.C.; Amaral, M.C.S. Vinasse treatment using hybrid tannin-based Coagulation-Microfiltration-Nanofiltration processes: Potential energy recovery, technical and economic feasibility assessment. **Separation and Purification Technology**, v. 248, n. 117152, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117152>.
- LEE, E.; BITTENCOURT, P.; CASIMIR, L.; JIMENEZ, E.; WANG, M.; ZHANG, Q.; ERGAS, S. J. Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge. **Waste Management**, v. 95, p. 432-439, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.033>.
- MILANEZ, A. Y.; MAIA, G. B. S.; GUIMARÃES, D. D. Biogás: evolução recente e potencial de uma fronteira de energia renovável para o Brasil. **BNDES Setorial**, v. 27, n. 53, p. 177-216, mar. 2021.
- MINH, D. P.; SIANG, T. J.; VO, D-V. N.; PHAN, T. S.; RIDART, C.; NZIHOU, A.; GROUSET, D. Hydrogen production from biogas reforming: An overview of steam reforming, dry reforming, dual reforming, and tri-reforming of methane. **Hydrogen Supply Chains**, p. 111-166, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811197-0.00004-X>.
- MU, L.; ZHANG, L.; ZHU, K.; MA, J.; IFRAN, M.; LI, A. Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: synergistic enhancement on process stability and biogas production. **Science of the Total Environment**, v. 704, n. 135429, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135429>.
- MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BRÉON, F.-M.; COLLINS, W.; FUGLESTVEDT, J.; HUANG, J.; KOCH, D.; LAMARQUE, J.-F.; LEE, D.; MENDOZA, B.; NAKAJIMA, T.; ROBOCK, A.; STEPHENS, G.; TAKEMURA, T.; ZHANG, H. **Anthropogenic and natural radiative forcing**. In: CLIMATE change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 659-740. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>.
- NOVACANA. **[Unica] Atualização da produção de etanol 2021/22 – 2ª quinzena de janeiro**. 15 fev. 2022. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/etanol/mercado/unica-atualizacao-producao-etanol-2021-22-quinzena-janeiro-150222>. Acesso em: 2 set. 2022.
- OTERO, A.; MENDOZA, M.; CARRERAS, R.; FERNÁNDEZ, B. Biogas production from slaughterhouse waste: effect of blood content and fat saponification. **Waste Management**, v. 133, p. 119-126, Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.035>.
- OZORIO, L. V. **Desenvolvimento de um simulador para a geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo de resíduos alimentares**. 2018. Projeto (Graduação em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PARK, M.-J.; KIM, J.-H.; LEE, Y.-H.; KIM, H.-M.; JEON, D.-W. System optimization for effective hydrogen production via anaerobic digestion and biogas steam reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 55, p. 30188-30200, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.027>.
- PATRIZIO, P.; LEDUC, S.; CHINESEA, D.; DOTZAUERC, E.; KRAXNER, F. Biomethane as transport fuel – a comparison with other biogas utilization pathways in northern Italy. **Applied Energy**, v. 157, p. 25-34, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.074>.
- PHOEBE-ZOE, M.-G.; KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A.; PAPADOPOULOS, A. G. Compost versus biogas treatment of sewage sludge dilemma assessment using life cycle analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 350, n. 131490, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131490>.
- POBLETE, I. B. de S. **Simulação e análise de produção e condicionamento de biogás**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PÖSCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. **Applied energy**, v. 87, n. 11, p. 3305-3321, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.011>.
- RESCH, C.; WÖRL, A.; WALTENBERGER, R.; BRAUN, R.; KIRCHMAYR, R. Enhancement options for the utilisation of nitrogen rich animal by-products in anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 2503-2510, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.044>.

RHEE, C.; KIM, D. W.; YU, S. II.; LEE, M. E.; SHIN, J.; KIM, H.-W.; CHUNG, J. W.; SHIN, S. G. Biogas potential assessment and characterization of Korean slaughterhouse waste for anaerobic digestion. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, n. 101858, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101858>.

Rocha-Meneses, L.; Zannernl, R.; Inayat, A.; Abdallah, M.; Shanableh, A.; Ghenal, C.; Kamil, M.; Kikas, T. Current progress in anaerobic digestion reactors and parameters optimization. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02224-z>.

ROMERO, H. I.; VEGA, C.; FEIJOÓ, V.; VILLACRESES, D.; SARMIENTO, C. Methane production through anaerobic co-digestion of tropical fruit biomass and urban solid waste. **Energy Reports**, v. 6, p. 351-357, 2020. Supplement 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.170>.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

SHANMUGAM, K.; BAROTH, A.; NANDE, S.; YACOUT, D. M. M.; TYSKLIND, M.; UPADHYAYULA, V. K. K. Social cost benefit analysis of operating compressed biomethane (CBM) transit buses in cities of developing nations: a case study. **Sustainability**, v. 11, n. 15, p. 4190, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11154190>.

SIEGERT, I.; BANKS, C. The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 11, p. 3412-3418, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.01.025>.

SOUZA, J. de; SOUZA, S. N. M. de; MACHADO, P. R. M. Desempenho de um motor Ciclo Otto utilizando biogás como combustível. **Encontro de Energia no Meio Rural**, p. 1-6, 2004. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n5v1/044.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2022.

SUNADA, N. S.; ORRICO, A. C. A.; ORRICO JUNIOR, M. A. P.; LUCAS JUNIOR, J. D.; LOPES, W. R. T.; SCHWINGEL, A. W. Anaerobic co-digestion of animal manure at different waste cooking oil concentrations. **Ciência Rural**, v. 48, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170517>.

UNICA. **Biogás pode aumentar em 66% a geração de energia no setor**. 6 out. 2021. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/biogas-pode-aumentar-em-66-a-geracao-de-energia-no-setor/>. Acesso em: 2 ago. 2022.

UNITED NATIONS. **Goal 11: make cities inclusive, safe, resilient and sustainable**. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>. Acesso em 2 ago. 2022.

VELUCHAMY, C.; GILROYED, B. H.; KALAMDHAD, A. S. Process performance and biogas production optimizing of mesophilic plug flow anaerobic digestion of corn silage. **Fuel**, v. 253, p. 1097-1103, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.104>.

WANG, Y.; ZHANG, Y.; LI J.; LIN, J.-G.; ZHANG, N.; CAO, W. Biogas energy generated from livestock manure in China: Current situation and future trends. **Journal of Environmental Management**, v. 297, n. 113324, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113324>.

YANG, L.; GE, X.; WAN, C.; YU, F.; LI, Y. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 1133-1152, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.008>.

YUE, Q.; GUO, P.; WU, H.; WANG, Y.; ZHANG, C. Towards sustainable circular agriculture: an integrated optimization framework for crop-livestock-biogas-crop recycling system management under uncertainty. **Agricultural Systems**, v. 196, n. 103347, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103347>.

ZHAO, X.; JOSEPH, B.; KUHN, J.; OZCAN, S. Biogas reforming to syngas: a review. **iScience**, v. 23, n. 5, p. 101082, Apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101082>.

Embrapa

Agroenergia

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



CGPE 017849