

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL ANNIBOLETI SANTOS

UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA
RENOVÁVEL SEGUINDO CONCEITOS SUSTENTÁVEIS

RIO DE JANEIRO

2024

GABRIEL ANNIBOLETI SANTOS

UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA
RENOVÁVEL SEGUINDO CONCEITOS SUSTENTÁVEIS

Trabalho de conclusão de apresentado ao curso de
MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais
Renováveis, do Setor de Ciências Agrárias,
Universidade Federal do Paraná, com requisito
parcial à obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Dhyogo Miléo Taher

RIO DE JANEIRO

2024

Análise do biodigestor segundo sua utilização como fonte de energias renováveis seguindo os conceitos sustentáveis

Gabriel Anniboletti Santos

RESUMO

A Revolução Industrial e suas consequências ambientais, destacando a urgência de alternativas sustentáveis no século XXI. Introduz o uso de biodigestores no Brasil desde 1970, incentivado pelo governo para enfrentar desafios na geração de energia e gestão de resíduos. Explicação do funcionamento do biodigestor, seu papel na produção de biogás e biofertilizantes, e diferença entre os tipos contínuo e de lote. O objetivo do trabalho é divulgar a importância dos biodigestores, destacando sua relação com a sustentabilidade e sua contribuição para fontes de energia renovável. A metodologia inclui uma revisão bibliográfica. O artigo inicia com avanços tecnológicos, apresenta os biodigestores e aborda os tipos. Conclui destacando a sustentabilidade do biodigestor como fonte de energia, ressaltando riscos e benefícios para o meio ambiente e a transição para uma economia circular.

Palavras-chave: Biodigestão. Sustentabilidade. Resíduos. Biodigestores. Energias.

ABSTRACT

The Industrial Revolution and its environmental consequences, highlighting the urgency of sustainable alternatives in the 21st century. Introducing the use of biodigesters in Brazil since 1970, encouraged by the government to tackle challenges in energy generation and waste management. Explanation of how biodigesters work, their role in producing biogas and biofertilizers, and the difference between continuous and batch types. The objective of the paper is to disseminate the importance of biodigesters, highlighting their relationship with sustainability and their contribution to renewable energy sources. The methodology includes a literature review. The article begins with technological advancements, presents biodigesters, and discusses the types. It concludes by emphasizing the sustainability of biodigesters as an energy source, highlighting risks and benefits to the environment and the transition to a circular economy.

Keywords: Keywords: Digestion. Sustainability. Waste. Biodigesters. Energies.

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, ao investir na produção em massa e na urbanização, desencadeou mudanças profundas nas estruturas sociais e econômicas, resultando em um rápido crescimento populacional e uma necessidade voraz por recursos naturais que trouxeram consigo impactos ambientais devastadores. O esgotamento de recursos, a poluição atmosférica e a manipulação do solo são inerentes à maquinaria do progresso. À medida que adentramos o século XXI, encontrar alternativas sustentáveis torna-se uma necessidade, razão pela qual os biodigestores emergem como uma resposta inovadora a esse chamado.

Embora os biodigestores sejam altamente favoráveis do ponto de vista dos recursos, precisam ser consideradas as possibilidades de impactos negativos do mesmo, como o descarte incorreto da biomassa, que pode contaminar o solo, o lençol freático e gerar a proliferação de bactérias (RODRIGUES, *et al.*, 2018). O sistema elétrico brasileiro utiliza o potencial hídrico, que combinados com as características de relevo possibilitam a criação de usinas hidrelétricas (ANDRADE, *et al.*, 2002). Essa é uma fonte de energia que se faz possível para muitos e em larga escala, porém, utiliza muitos recursos e ainda não é acessível a todos de maneira plena, razão pela qual os biodigestores surgem como uma alternativa de suprir as demandas de energia elétrica oriundas de outros meios.

O território nacional, devido à sua larga extensão, possui um déficit em seu fornecimento elétrico, tendo dificuldade em implantar uma rede de transmissão elétrica que alcance a todos. Por isso, o território brasileiro deve se favorecer da adoção de soluções locais para o suprimento de energia e fertilizantes sem que seja necessária uma maior logística de transporte e fornecimento.

Os biodigestores são equipamentos vedados e impermeáveis nos quais os materiais orgânicos são depositados para a fermentação anaeróbia, ou seja, realizam um armazenamento sem que haja contato com ar atmosférico. O processo bioquímico denominada digestão anaeróbia consiste no armazenamento de materiais biológicos por um período determinado até que se reduza a concentração de micro-organismos patogênicos, além de resultar na estabilização da matéria orgânica, produzindo, finalmente, uma fonte de energia alternativa chamada de biogás, além de produzir outros gases como metano, dióxido de carbono e até mesmo fertilizantes biológicos (RODRIGUES, *et al.*, 2018).

Segundo CORIOLETTI (2022), a implementação do uso de biodigestores no Brasil teve início no ano de 1970, por intermédio de incentivos governamentais que objetivavam minimizar os problemas relacionados à crise do setor de geração de energia elétrica e acúmulo de resíduos no meio rural e urbano.

O biodigestor é composto por um reservatório de biomassa e uma câmara (gasômetro) que armazena o biogás produzido. Existem dois tipos de digestores biológicos: contínuo e de lote. Enquanto os digestores contínuos recebem um fornecimento diário de biomassa, os de lote recebem desde o primeiro momento a capacidade máxima de armazenamento até a biodigestão completa (CORIOLETTI, *et al.*, 2022).

O biogás é o resultado da ação de bactérias metanogênicas em condições específicas de pH, temperatura e relação carbono/nitrogênio da biomassa. A produção de biogás e biofertilizante por meio deste sistema contribui para as propriedades rurais, proporcionando benefícios financeiros, integração com diversas atividades rurais, geração de energia renovável, reciclagem de nutrientes e melhoria do saneamento ambiental (CORIOLETTI, *et al.*, 2022).

O objetivo desse trabalho é contribuir com a sustentabilidade ambiental e divulgar a importância dos biodigestores, não apenas como fonte de energia renovável, mas também como fonte de benefícios diversos para a sociedade, como por exemplo a redução de prejuízos climáticos e fatores relacionados ao saneamento, assim como, sua presença no atual cenário brasileiro (CIBIOGÁS, 2022). O artigo pretende em sua conclusão apontar o biodigestor como uma fonte de energia realmente sustentável, destacando suas contribuições para a preservação do meio ambiente e o impulso na direção de uma economia circular.

Para alcançar o objetivo pretendido, foi adotada como metodologia de pesquisa uma revisão bibliográfica sobre Biodigestores, assim como dados e índices informativos atuais.

2 ASPECTOS AMBIENTAIS

Abordar a sustentabilidade de uma técnica sem abordar alguns conceitos referentes aos aspectos ambientais torna a discussão rasa, portanto, se faz

necessário discutir alguns conceitos como resíduos, o estudo do ciclo da vida de cada material e como isso pode impactar o meio ambiente.

2.1 RESÍDUOS NO BRASIL

Ao se tratar de resíduos, é necessário se considerar a distinção entre resíduos e rejeitos. Resíduos são aqueles gerados em diversos âmbitos, como por exemplo, domiciliar, comércio, serviços de pequeno porte e limpeza urbana, podendo ser divididos entre recicláveis secos ou orgânicos. Os rejeitos são resíduos sólidos que já tiveram seu tratamento e recuperação esgotados, não sendo possível uma outra utilização adequada do ponto de vista ambiental (BRASIL, 2022).

No Brasil, em 2022, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi atualizada, estabelecendo as diretrizes de forma abrangente quanto à forma de tratar resíduos sólidos, definindo as medidas a serem seguidas através de um grau de prioridade, optando pela não geração, redução, reutilização e reciclagem. Entretanto, para que seja alcançada utilização e descarte corretos destes resíduos, é necessário reconhecer que nem todos serão passíveis de reciclagem ou tratamentos convencionais, ainda que se façam presentes no dia-a-dia.

Ao tratar resíduos, é fundamental que seja feito um estudo acerca de sua composição gravimétrica para que sejam escolhidas as melhores formas de tratamento. Isso possibilita a melhor decisão sobre reciclagem, reutilização, compostagem, biodigestão e valorização energética, assim como quais as tecnologias mais indicadas, reduzindo impactos ambientais e tornando o processo o mais sustentável possível (SILVA, *et al.*, 2014).

A PNRS traz em seu rol de possibilidades a utilização de tecnologias de recuperação energética, sendo uma alternativa sustentável para o destino de alguns resíduos. A queima controlada de resíduos, observados aspectos operacionais, ambientais e de saúde ocupacional resultam em geração de energia (SILVA, *et al.*, 2014).

A reciclagem e a recuperação energética são consideradas estratégias complementares ao tratamento de resíduos sólidos, devendo ser aplicadas com base na análise das características dos materiais e condições locais nos quais os mesmos se encontram. Destaca-se uma preferência pela utilização da reciclagem para

materiais secos e separados na fonte, e recuperação energética quando houver resíduos mistos e contaminados (SILVA, *et al.*, 2014).

Outras técnicas como compostagem e a biodigestão (com ou sem conversão energética) são mais recomendadas nos casos de reciclagem de resíduos orgânicos (ZAGO; BARROS, 2019). Nesses casos, deve ser considerada a possibilidade de contaminação do solo e da água e de possíveis danos ambientais, que precisam ser observados a médio e longo prazo (ANDRADE, *et al.*, 2002). Portanto, é importante realizar um tratamento adequado dos biofertilizantes produzidos nos biodigestores antes de aplicá-los diretamente ao solo, a fim de impedir possíveis impactos futuros ao meio ambiente devido ao contato inadequado do mesmo com materiais ricos em nitrogênio e fósforo.

2.2 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA ("BERÇO AO TÚMULO"):

A proteção ambiental a partir da redução dos impactos causados por produtos ao longo da sua vida passou a ter destaque no mundo todo, resultando no surgimento de uma técnica chamada Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A ACV tem como objetivo compreender e quantificar o quanto um produto pode impactar o meio ambiente desde a extração de sua matéria prima até o descarte. Ao realizar tal análise, é possível identificar os pontos de melhoria durante o processo, reduzindo seu impacto ambiental. Essa técnica possibilita e orienta decisões mais sustentáveis que podem influenciar no design, produção e até consumo de um produto. (NBR ISO 14040)

2.3 Ciclo produtivo do biogás

O ciclo produtivo do biogás descrito na figura 1, de acordo com MDR (2013), começa com a produção, que envolve a seleção das fontes de matéria-prima, os resíduos orgânicos, onde são destinados aos biodigestores. Durante a produção, os materiais orgânicos são processados nos biodigestores para produzir biogás. Em seguida, o biogás pode passar por processos de purificação para remover impurezas e aumentar seu poder calorífico, tornando-o mais adequado para certas aplicações.

Após o processamento, o biogás pode ser distribuído através de redes de gás ou tanques de armazenamento para uso em residências, indústrias ou como combustível veicular. A distribuição é uma etapa crítica, pois influencia a acessibilidade e disponibilidade do biogás para os consumidores finais. Finalmente, o biogás é utilizado como fonte de energia, seja na geração de eletricidade, aquecimento ou como combustível (MDR, 2013)

Em suma, cada etapa do ciclo produtivo do biogás afeta diretamente o resultado global do processo. A eficiência e a sustentabilidade de cada fase são fundamentais para garantir que o biogás seja produzido e utilizado de forma responsável, minimizando seu impacto ambiental e contribuindo para a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Figura 1 – Ciclo Produtivo do Biogás



FONTE: Autoria própria baseada em MDR (2013).

2.4 BIOGÁS E BIOFERTILIZANTES

A utilização de combustíveis de origem fóssil se mostra cada vez mais insustentável a longo prazo, seja pela sua redução gradual, o aumento dos custos ou pela instabilidade dos principais países produtores, se fazendo necessário o surgimento de fontes renováveis que tragam menos danos ambientais. Embora o presente trabalho seja focado na produção de energia através da biomassa, outras opções de fontes renováveis seriam a energia eólica, solar, hidráulica, entre outras. A biomassa originada de fonte animal possui um amplo potencial energético como combustível, além de ser uma das melhores alternativas sustentáveis (DORNELAS, *et al.*, 2014).

Através da biodigestão anaeróbia, é possível tratar substratos e resíduos orgânicos, resultando na produção do biogás. Um conjunto de bactérias anaeróbias armazenadas em um ambiente sem oxigênio resulta na degradação da matéria orgânica (CORIOLETTI, *et al.*, 2022). A composição do gás produzido possibilita sua utilização na produção de energia em diversas formas, como térmica e elétrica.

As características do Biogás são o que possibilita sua utilização e importância no cenário atual. Em sua constituição básica há metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de traços de nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), oxigênio (O_2) e gás sulfídrico (H_2S) (DORNELAS, *et al.*, 2014). De acordo com o demonstrado no Quadro 1, sua composição pode sofrer alterações em função do tipo de substrato utilizado ou da forma de tratamento e condições operacionais, podendo ser caracterizado (DORNELAS, *et al.*, 2014).

Quadro 1 - Composição do Biogás

Parâmetros	Biogás de biodigestor	Unidades
CH_4	60 – 70	% mol
Hidrocarbonetos pesados	0	% mol
H_2	0	% mol
CO_2	30 – 40	% mol
H_2O	1 – 5	% mol
N_2	0,2	% mol
O_2	0	% mol
H_2S	0 – 1000	PPM
NH_3	0 – 100	PPM

FONTE: Autoria própria baseada em Kons (2020).

A utilização do biogás pode se dar de maneira direta, no entanto, a depender se sua aplicação pode ser necessária um tratamento posterior, reduzindo ou eliminando

concentrações de sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono, umidade ou alterações na pressurização. Sua utilização ocorre como a de qualquer outro gás combustível, sendo inodoro como butano. No entanto, durante seu processo de produção ocorre a mistura com gás sulfídrico, o que resulta em um forte odor, não havendo acréscimos de odorizantes por questões de segurança. (ANDRADE, *et al.*, 2002).

Durante a biodigestão há, ainda, o resultado de um tipo de biofertilizante. Fertilizantes, como um todo, alimentam plantas, possibilitando uma nutrição simplificada dos nutrientes. O biofertilizante originário do processo de biodigestão, possui todos os nutrientes que são encontrados nos dejetos frescos expostos de forma estável e disponível para nutrir as plantas, sendo um adubo orgânico com propriedades que melhoram os aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, além proteger contra pragas e doenças (DORNELAS, *et al.*, 2014).

Destaca-se que a utilização de biofertilizantes na agricultura deve ser realizada com cuidado devido à presença de microrganismos patogênicos que podem vir a ser encontrados nos biofertilizantes, razão pela qual deve ser utilizado equipamentos de segurança no manuseio. Entretanto, os biofertilizantes podem impactar positivamente doenças parasitárias, caso sejam muito comuns na região, promovendo ainda uma melhoria da higiene devido ao correto tratamento de efluentes (ANDRADE, *et al.*, 2002).

3 DESENVOLVIMENTO DOS BIODIGESTORES ANAERÓBIOS

O interesse tecnológico sempre moveu o ser humano na busca por novas ferramentas, avançando em diversas áreas, tal como as fontes energéticas. Devido às pesquisas realizadas, novas ferramentas possibilitam extrair elementos que sempre se fizeram presentes no meio ambiente, porém, não eram acessíveis ao homem. Atualmente, é possível alcançar o máximo aproveitamento de elementos, como o metano.

Em 1806, Humphrey Davy inventou os primeiros biodigestores, tendo identificado a existência de um gás rico em carbono e dióxido de carbono, originados da decomposição de resíduos biológicos em locais úmidos (BEZERRA, *et al.*, 2014). Os Chineses viram nessa tecnologia o biofertilizante necessário para suprir a

produção de alimentos. Já os Indianos viram um meio de cobrir o déficit de energia presente em seu país.

Através de diversas pesquisas que possibilitaram a difusão do uso de biodigestores, foi criado em 1939, na Índia, o Institute Gobár Gás (Instituto de Gás de Esterco). Este instituto buscava realizar o tratamento de dejetos animais, obter biogás e utilizar o biofertilizante extraído. Através deste instituto, caracterizado como a primeira usina de gás de esterco no mundo, foi possível construir quase meio milhão de biodigestores no país (BEZERRA, *et al.*, 2014).

3.1 BIODIGESTORES

O biodigestor é um reservatório hermeticamente fechado que opera sem contato direto com o ambiente externo. Esse dispositivo é equipado com pontos distintos de entrada, saída e coleta de resíduos, desempenhando um papel fundamental na geração autônoma de biogás a partir de materiais orgânicos, tais como resíduos provenientes da suinocultura, bovinocultura, avicultura, bem como efluentes das indústrias alimentícias, como abatedouros, frigoríficos, laticínios e cervejarias, incluindo também restos de alimentos. Antes de serem introduzidos no biodigestor, esses resíduos passam por um processo de preparação e homogeneização. Dentro do biodigestor, ocorre um significativo processo de fermentação, conduzido por microrganismos, que convertem os resíduos em biogás e digestato. Este ciclo completo demanda aproximadamente 30 dias, período conhecido como tempo de retenção hidráulica (TRH), o qual é determinado com base na degradabilidade do resíduo e na tecnologia específica adotada, refletindo nos diferentes tipos de biodigestores existentes, cada um com características distintas (CORIOLETTI, *et al.*, 2022).

Atualmente, a utilização de biodigestores no meio rural é vista de forma negativa, após repetidos erros de projetos, execução, operação ou manutenção. Embora decorrente de um pré-conceito equivocado, há essa concepção de que esta tecnologia está relacionada a pessoas de baixa renda e subdesenvolvimento, não como uma alternativa sustentável (ANDRADE, *et al.*, 2002).

Santos *et al.*, (2017) realizaram pesquisa que aponta que 34% dos produtores rurais não possuem um destino para os resíduos orgânicos gerados em sua

propriedade, seguido de 32% que afirmam lançar seus dejetos em fossa séptica, 16% que despejam em rios ou córregos próximos, 10% enterram e 8% apenas afirmaram reciclar o material com a transformação através de compostagem. Os mesmos pesquisadores ainda questionaram esses produtores rurais acerca do conhecimento dos mesmos sobre a função e importância de um biodigestor em uma propriedade rural, tendo restado comprovado que 46% não tinham conhecimento, enquanto 20% acreditavam que esses equipamentos produziam energia elétrica e 24% informaram que produziam gás, tendo apenas 2% que possuíam total conhecimento sobre o tema (SANTOS, *et al.*, 2017).

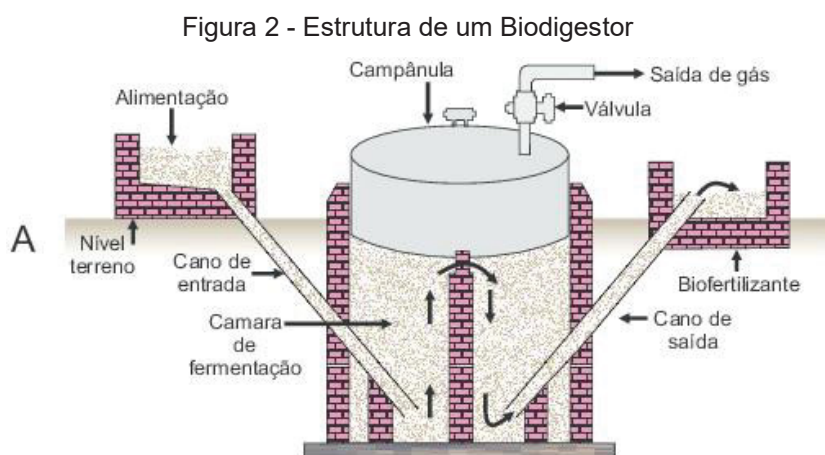
3.2 MODELOS DE BIODIGESTORES

A construção de biodigestores apresenta uma variedade de opções, desde tanques revestidos com manta impermeável de PVC, tubos rígidos de PVC, alvenaria e também de fibra de vidro. Independente do material escolhido, é crucial que o biodigestor seja totalmente vedado, criando um ambiente isento de oxigênio. Além da construção, a forma de abastecimento é uma variável significativa no desempenho do biodigestor. Dois métodos se destacam: o abastecimento em lote e o contínuo. No primeiro, o biodigestor recebe uma carga única de matéria-prima, que permanece por um período determinado, permitindo a completa digestão. Após esse período, o biodigestor é descarregado e novamente preenchido. Por outro lado, o abastecimento contínuo ocorre diariamente, proporcionando uma dinâmica de carga de biomassa constante ao biodigestor (FERREIRA, *et al.*, 2013).

O sistema de biodigestão é composto por três componentes essenciais: a caixa de carga, responsável pela mistura da matéria-prima com água; o tanque de fermentação, onde ocorre a produção de biogás; e a caixa de descarga, utilizada para extrair o biofertilizante resultante (FERREIRA, *et al.*, 2013). Embora o objetivo seja o mesmo, há modelos diversos de como construir esses biodigestores, havendo 4 modelos que serão abordados neste tópico: modelo indiano, modelo chinês, modelo canadense e modelo descontínuo.

3.2.1 MODELO INDIANO

O Modelo Indiano utiliza uma campânula flutuante com gasômetro possibilitando estar imersa sobre a biomassa em fermentação ou em um selo de água externo objetivando reduzir as perdas durante o processo bioquímico de geração do gás. Há uma parede no centro que permite que o tanque de fermentação possua câmara dupla (DEGANUTTI, *et al.*, 2004). Destaca-se que este modelo é de fácil construção, conforme demonstrado na Figura 2, no entanto, pode ser bastante oneroso, visto que o mesmo é feito com base metálica, além de demandar a instauração de uma logística eficiente de transporte no meio rural (JORGE; OMENA, 2012). Apesar disso, ANDRADE, *et al.*, (2002) ressaltam que este foi o modelo que mais foi construído no Brasil.



Fonte: Junqueira (2024)

Este modelo permite uma flutuação diretamente sobre o lodo que está sendo digerido ou em um selo hídrico. Desta forma, permite-se a manutenção da pressurização do gás. Nos dias atuais, novas campânulas flutuantes feitas de fibra de vidro estão sendo utilizadas, por este ser um material mais acessível, barateando seu custo final. ANDRADE, *et al.*, (2002) destacam uma outra técnica que vem sendo desenvolvida é a utilização de ferrocimento na construção, desenvolvido majoritariamente pela Universidade Federal do Ceará, através do Projeto Ferrocimento, que construiu biodigestores com campânulas flutuantes utilizando esta

técnica. No entanto, embora haja boa impermeabilidade à água, não é permeável ao biogás e necessita de revestimento que promova a impermeabilização, devido a pequenas fissuras que podem ocorrer. Essas pequenas fissuras podem ser corrigidas com uma capa de pintura elástica de alta espessura ou de epóxi aplicada na parte interna da campânula (ANDRADE, *et al.*, 2002).

O modelo indiano acaba sendo o mais apropriado num sistema de alimentação contínua, de acordo com os resíduos disponíveis para pequenos produtores rurais (ANDRADE, *et al.*, 2002).

3.2.2 MODELO CHINÊS

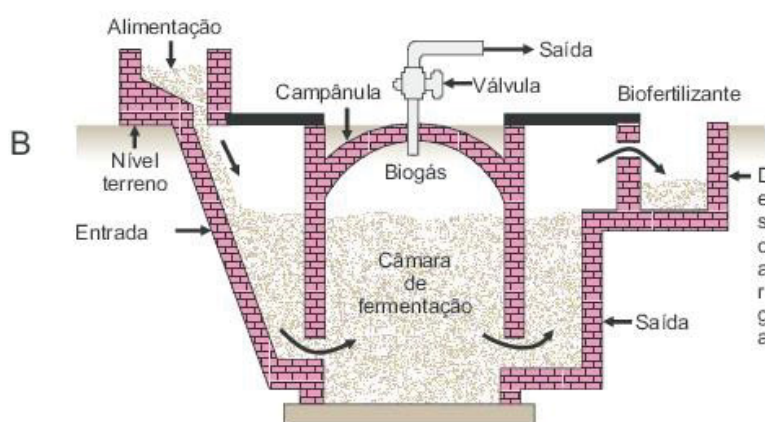
O Modelo Chinês é caracterizado por um equipamento cilíndrico em alvenaria, com o teto abobadado, impermeabilizado, possibilitando o armazenamento do biogás produzido. Este equipamento, por ser feito em alvenaria, como observado na Figura 3, possui um custo menor e uma duração maior por ser feito com materiais mais duráveis, porém, há maiores problemas de vazamento nos casos de vedação e impermeabilização feitos de maneira precária (ANDRADE, *et al.*, 2002). Este modelo tem como principal característica a variação de pressão no gasômetro, portanto, para que seja mantida uma variação constante para alimentação de equipamentos, um regulador de pressão ou um depósito de gás flutuante se faz necessário. No estudo de Andrade, *et al* (2002), ele aponta o equipamento da seguinte forma.

Este equipamento é composto por uma pequena campânula e um mecanismo feito com conexões de PVC, que possibilita que esta campânula fique enchendo e subindo, quando o gás não está sendo utilizado, e esvaziando e descendo, quando o gás é utilizado. Este dispositivo fica então abrindo ou fechando um registro de feixe rápido, enquanto o gás, armazenado na campânula fica sob uma pressão constante de utilização. Na prática, este dispositivo provoca um estrangulamento neste registro, ou seja, uma perda de carga que é proporcional à vazão de gás que está sendo utilizada (ANDRADE, *et al.*, 2002).

Destaca-se que a impermeabilização do gasômetro em biodigestores chineses pode ser bem complicada em regiões que não possuem acesso à energia elétrica e à água. De acordo com ANDRADE (2002), os vazamentos podem não ser

evidentes em testes de carga simples, surgindo apenas durante o funcionamento do biodigestor. As fissuras muitas vezes se expandem e os vazamentos ocorrem sob condições de variação de pressão. Outro obstáculo proveniente da utilização deste modelo é quanto à ausência de descarga automática, sendo de difícil manejo. Portanto, recomenda-se sua utilização em casos de mão-de-obra experiente, além de haver uma assessoria regular durante um longo período, podendo ser algo difícil em meios rurais (ANDRADE, *et al.*, 2002).

Figura 3 - Estrutura de um Biodigestor Modelo Chinês



Fonte: Araújo (2017)

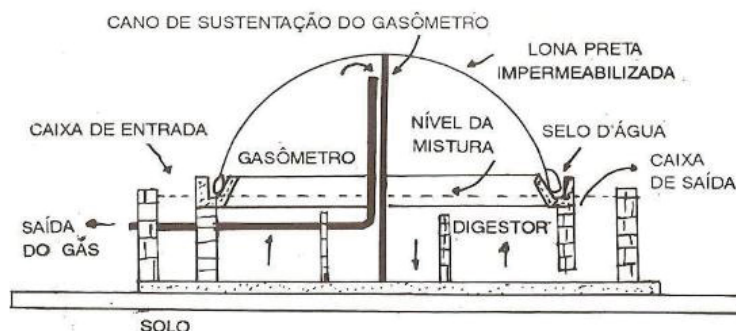
3.2.3 MODELO CANADENSE

O Modelo Canadense, representado pela Figura 4, foi concebido com mais tecnologia, sendo, portanto, mais avançado, porém de manejo mais simples. Este modelo foi introduzido no Brasil em 1970, utilizando-se uma câmara de digestão instalada no solo e gasômetro inflável feito de plástico ou outro material similar, com forma horizontal e uma caixa de entrada feita em alvenaria (DEGANUTTI, *et al.*, 2002). Embora este modelo possua menor risco de vazamentos, a utilização de um material plástico na construção da cúpula do biodigestor, comumente o PVC, pode onerar o custo final deste modelo (CASTANHO; HARRUDA, 2008). ANDRADE, *et al.*, (2002) definiram o modelo da seguinte forma:

Este modelo é desvantajoso se considerada sua vida útil de aproximadamente 5 anos e ser sensível a danos, não sendo recomendado se o local correr riscos de cortes da lâmina, além de outras desvantagens. Este modelo apresenta as seguintes desvantagens: curta vida útil (cerca de 5 anos), é sensível a danos - não é recomendado para locais onde esteja sujeito a cortes da lâmina - e utiliza pouca mão-de-obra local durante a construção. É importante que a lâmina utilizada seja tratada contra os raios ultravioleta para aumentar a vida útil destes gasômetros de material plástico, sendo conveniente a construção de uma coberta, de preferência de materiais acessíveis, como madeira e palha. Neste modelo precisa-se instalar um sistema com lastro para regular a pressão do gás. Outra desvantagem é que estes reatores são mais sensíveis às variações térmicas que os outros modelos. Sua utilização é recomendada para locais onde predominem temperaturas altas e constantes. Em regiões frias estes biodigestores podem ser equipados com um sistema de aquecimento e protegidos do vento (ANDRADE, *et al.*, 2002).

Portanto, visando uma vida útil mais longa e menores custos resultantes de consertos, devem ser observadas as condições citadas acima.

Figura 4 - Estrutura de Um Biodigestor Modelo Canadense



Fonte: Araújo (2017)

3.2.4 MODELO DESCONTÍNUO

O Modelo Descontínuo, também conhecido como biodigestor de batelada, é uma abordagem simples e eficaz para a produção de biogás a partir de biomassa. O biogás se forma dentro deste tambor. Este modelo utiliza alvenaria para compor sua câmara de fermentação, além de um medidor de gás portátil metálico. Este modelo é recomendado para pequenas produções e recomenda-se ter dois biodigestores, visto

que quando um se esgota, é preciso esvaziá-lo para poder preenchê-lo novamente e reiniciar o processo (CORIOLETTI, *et al.*, 2022).

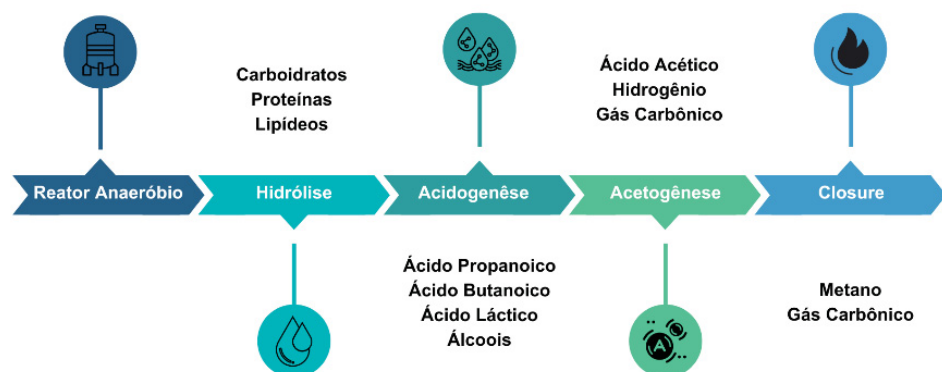
4 ETAPAS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO

O processo de biodigestão anaeróbia se dá por meio de microrganismos que resultam na degradação, transformação ou decomposição da biomassa. É possível digerir produtos biodegradáveis sintéticos e não apenas orgânicos (CORIOLETTI, *et al.*, 2022). A biodigestão se dá em diversos estágios, sendo eles: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

A composição do biogás pode variar de acordo com o tipo e a quantidade de biomassa inserida no biodigestor, o tamanho deste, e os fatores climáticos. A temperatura ótima para o processo de digestão anaeróbia realizado por microrganismos está na faixa de 25°C a 45°C, valores compatíveis com as temperaturas predominantes no Brasil (FERREITA *et al.*, 2013).

Na Figura 5, é possível visualizar o processo das etapas da digestão anaeróbia, que é ilustrado por meio de um fluxograma, demonstrando como ocorre a degradação do substrato dentro do reator (GONÇALVES, 2013).

Figura 5 - Etapas da Digestão Anaeróbia



Fonte: Autoria própria baseada em MCTI *et al.*, (2020).

4.1 HIDRÓLISE

Nesta fase, há a quebra de cadeias de carbono de proteínas, lipídeos e carboidratos, tornando-os substâncias mais simples (aminoácidos, açúcares, glicerol e ácidos graxos). A quebra dessas moléculas orgânicas possibilita aos microrganismos absorverem as partes menores, aproveitando a energia armazenada. A hidrólise desempenha um papel fundamental pois facilita as etapas subsequentes da decomposição. (CORIOLETTI, *et al.*, 2022)

A reação da hidrólise ocorre de maneira mais lenta e incompleta, se comparada a outras substâncias, visto que sua velocidade está intrinsecamente relacionada ao tipo e estrutura do material orgânico (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

ACIDOGÊNESE

Durante a acidogênese, as substâncias que resultam da hidrólise são transformadas por bactérias acidogênicas em ácido propanoico, ácido butanoico, ácido láctico e álcoois, assim como hidrogênio e gás carbônico. A quantidade de hidrogênio dissolvida na mistura impacta diretamente a formação de produtos. Se houver uma concentração muito alta de hidrogênio, resultará numa interferência negativa na eficiência desta etapa, causando o acúmulo de ácidos orgânicos, reduzindo o pH da mistura e afetando o processo (Araújo, 2017).

4.2 ACETOGÊNESE

Na acetogênese, ocorre a transformação dos materiais resultantes da fase anterior em hidrogênio, ácido etanoico e gás carbônico por bactérias acetogênicas. Essa fase é muito delicada pois o equilíbrio precisa ser mantido para que o hidrogênio gerado seja consumido pelas bactérias responsáveis pela metanogênese (Araújo, 2017).

4.3 METANOGÊNESE

Nesta etapa, ocorre a produção de metano, se dando por dois tipos distintos de bactérias. O primeiro produz metano convertendo ácido acético (bactérias acetotróficas), enquanto o outro produz através da conversão de hidrogênio e dióxido de carbono (bactérias hidrogenotróficas)

4.4 TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Esta etapa ocorre após a produção do biogás, para que o mesmo possa ser utilizado de forma adequada. Este tratamento pode variar de acordo com a tecnologia e o substrato empregados e até mesmo o tipo de biodigestor que foi utilizado para sua produção. Esta etapa é importante devido às “impurezas” que podem ser encontradas no gás e que podem causar danos aos equipamentos e afetar a eficiência da conversão em energia (KUNZ, *et al.*, 2015). A purificação do biogás envolve a remoção de componentes traços perigosos, como água, sulfeto de hidrogênio (H_2S) e siloxanos. Métodos como condensação, adsorção em alumina ou zeólitas, refrigeração, absorção em solução aquosa e adsorção em coluna de leito fixo são utilizados para tratar essas impurezas. (CRISTIANO, 2015).

O H_2S , principal poluente do biogás, pode ser removido durante o processo de digestão, em unidades de tratamento independentes ou durante a eliminação de dióxido de carbono (CO_2). Para os siloxanos, o resfriamento do gás, adsorção com materiais como carvão ativado, gel de sílica e alumina ativada, e absorção por misturas líquidas de hidrocarbonetos são métodos eficazes.

A remoção simultânea de siloxanos durante o processo de eliminação de sulfeto de hidrogênio do biogás também é uma abordagem utilizada. Esse tratamento é essencial para garantir que o biogás possa ser utilizado com segurança e eficiência como fonte de energia (CRISTIANO, 2015).

O Quadro 2 apresenta o resumo dos impactos causados pelas principais impurezas do biogás descritas anteriormente, além dos impactos de outros compostos indesejáveis.

Quadro 2 - Impurezas do biogás e suas consequências

Impureza	Possível Impacto
Vapor d'água	Formação de substâncias corrosivas com H_2S , NH_3 e CO_2
Poeira e partículas	Entupimento de peças
H_2S	Corrosão de peças, alta toxicidade, formação de SO_2 e SO_3
CO_2	Baixo poder calorífico
Siloxanos	Entupimento e erosão de peças
Amônia	Corrosão quando dissolvida em água
Oxigênio (O_2)	Alta concentração de O_2 no biogás é explosiva
Compostos halogenados	Corrosão em máquinas de combustão

FONTE: Cristiano (2015)

5 BIOGÁS NO BRASIL

Nos dias atuais, após uma crise econômica causada por uma pandemia e a Guerra na Ucrânia, houve uma elevação natural no preço do gás natural na Europa e em outros países, resultando em volatilidade nos preços, que encarece matérias-primas e atrasando fornecimentos. No entanto, o mercado de biogás no Brasil se mantém aquecido. A busca por segurança energética e a mitigação das mudanças climáticas fortalecem a importância das energias renováveis, como biogás e biometano, na matriz energética global e brasileira.

O Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás) realizou um estudo com dados significativos sobre a situação do biogás no Brasil, com foco no ano de 2022. Houve um aumento de 15% no número de plantas de biogás em operação, assim como um aumento de 22% na produção de biogás. Os estudos ainda apontam para crescimentos em diferentes regiões do país, o que pode sugerir uma aceitação e adoção do biogás.

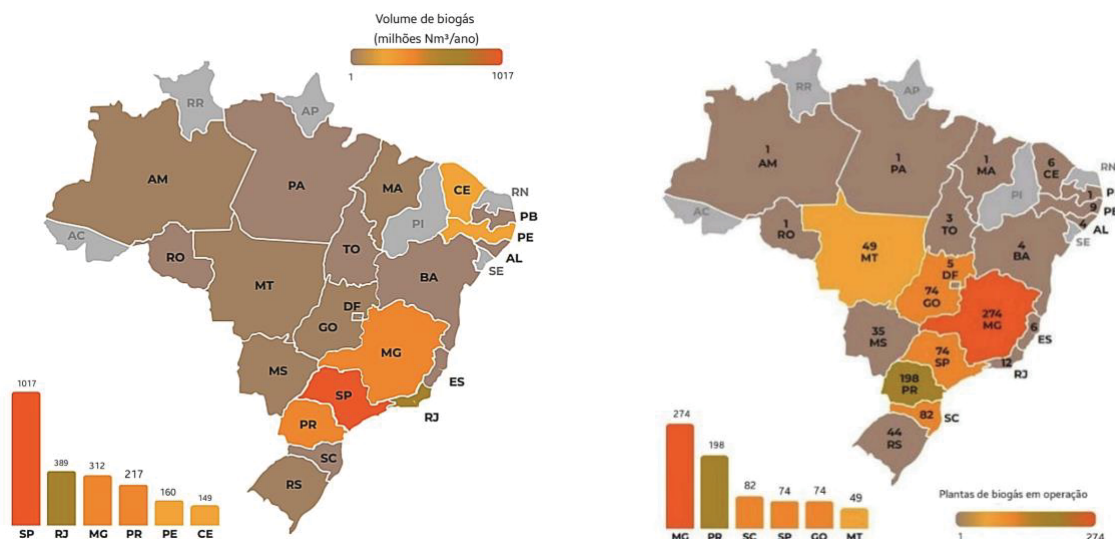
Frente ao exposto, pode-se observar o grande potencial de crescimento deste setor no Brasil, havendo um interesse cada vez maior nesta fonte de energia renovável, o que pode vir a representar uma mudança drástica no cenário da energia no Brasil.

5.1 PLANTAS EM OPERAÇÃO

Atualmente, o Sudeste possui uma grande parcela das plantas de biogás em operação, representando maior número de plantas como também volume produzido. Na figura 6, observa-se que estes números, possivelmente, refletem um maior

desenvolvimento e diversidade econômica na região, havendo um maior destaque para os estados de Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina, São Paulo e Goiás. Minas Gerais possui o maior número de plantas, enquanto São Paulo lidera em volume produzido (CIBIOGÁS, 2022).

Figura 6 – Volume X Plantas em operação



Fonte: Cibiogás (2022)

Ao analisar as plantas operando no Brasil, pode-se verificar áreas de concentração e as áreas que ainda possuem mais oportunidades de crescimento. Em 2022, o aumento foi de 82%, se em comparação ao ano anterior, no número de plantas de biometano, levando a crer num interesse crescente por essa alternativa energética. Na tabela 1, mostra outro atrativo para o crescimento de plantas de biogás no Brasil é a possibilidade de diversas aplicações do biogás, podendo ser aplicado em diferentes setores, resultando em uma fonte de energia mais sustentável e diversificada no Brasil.

Tabela 1 - Número de Plantas de Biogás em Operação

Principal uso do biogás	Agropecuária	Indústria	Saneamento	Total
Energia elétrica	647	37	79	763
Energia mecânica	6	0	0	6
Energia térmica	29	63	4	96
GNR/Biometano	4	8	8	20
Total	686	108	91	885

Fonte: Autoria própria baseada em Cibiogás (2022)

5.2 PLANTAS DE BIOGÁS

A produção de biogás no Brasil possui três categorias principais, de acordo com os substratos provenientes das seguintes atividades: agropecuária, indústria e saneamento.

O setor agropecuário é o principal impulsionador da produção de biogás no Brasil, representando 78% das operações de plantas no país. Os setores industrial e de saneamento contribuíram com 12% e 10% das plantas, respectivamente. Destaca-se que embora o setor de saneamento possua apenas 10% das plantas, o mesmo liderou em volume de biogás produzido, produzindo 74% do total, seguido pelos setores industrial (16%) e agropecuário (10%). (CIBIOGÁS, 2022)

O setor agropecuário é responsável por uma grande produção de resíduos orgânicos no país, portanto, seu reaproveitamento na produção de biogás é algo crucial. Houve um crescimento médio de 17%, nos últimos 3 anos, no número de plantas e em sua produção.

No setor das indústrias, a produção de biogás cresce continuamente. Em 2022, o setor industrial registrou 108 plantas em operação no Brasil. Neste setor, há um aproveitamento energético com foco na energia térmica, sendo utilizada majoritariamente em seus processos produtivos (CIBIOGÁS, 2022).

No setor de saneamento, há um aproveitamento energético gerado em aterros sanitários e centrais de energia que utilizam resíduos sólidos orgânicos. Em 2022, as plantas neste setor produziram o equivalente a 2,1 bilhões de Nm³/ano de biogás, a maior representatividade em volume total de biogás produzido no país. (CIBIOGÁS, 2022)

6 RISCOS À SUSTENTABILIDADE

Após a apresentação dos benefícios trazidos pela utilização dos biodigestores e produção de biogás, é necessário ser levado em consideração os possíveis danos à sustentabilidade e ao meio ambiente que esta prática pode ocasionar. Uma das limitações inerentes à produção de biogás se refere à corrosão e mau-cheiro,

principalmente quando há elevada concentração de gás sulfídrico, que resulta em uma maior toxicidade (Alves, *et al.*, 2010).

Outro risco que deve ser observado é quanto às possíveis substâncias tóxicas presentes no biogás. A presença excessiva de nutrientes ou elementos em solução pode resultar uma toxicidade ao meio bacteriano. Onde há criação animal, o uso de desinfetantes e bactericidas podem contaminar o esterco, resultando na morte de bactérias e afetando todo o processo de formação do biogás (Alves, *et al.*, 2010). A viabilidade econômica é um fator crítico para a sustentabilidade dos biodigestores. A falta de incentivos tecnológicos e políticas públicas inadequadas pode limitar a implementação e a eficácia dos biodigestores, impactando negativamente sua sustentabilidade (MIRANDA, *et al.*, 2024). No Brasil, observa-se que ainda há grande quantidade de desinformação sobre o descarte adequado dos dejetos (CARVALHO, 2022). É crucial assegurar que o ciclo de vida dos resíduos seja concluído de maneira sustentável, evitando impactos negativos ao meio ambiente.

Cada um desses riscos deve ser cuidadosamente considerado e mitigado para garantir que a produção de biogás por meio de biodigestores seja realmente uma prática sustentável e benéfica ao meio ambiente.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Frente ao exposto, os biodigestores possuem o potencial de suprir as demandas energéticas existentes atualmente no Brasil e no mundo, sendo, atualmente, uma forma complementar, e não uma alternativa de substituição. Os biogestores, devido ao seu potencial, já vem sendo bastante utilizado em diversos meios. Eles possibilitam a retirada de dejetos animais do meio ambiente, reduzindo as emissões de metano na atmosfera por meio da metanogênese, assim como pelo armazenamento do gás nos biodigestores, que permite sua utilização de diversas formas.

Entretanto, sua utilização deve vir com precauções, estudos e uma melhor fiscalização das construções realizadas, podendo expor o meio ambiente a riscos. Foi apontada no estudo de ANDRADE, *et al.*, (2002) a existência de construções com erros de projetos, execuções, operações e manutenção.. Ademais, alguns tipos de biodigestores possuem um tempo de vida curto, devido ao desgaste dos materiais

empregados, ou seja, observando todo o processo do berço ao tumulo, sem ignorar os prejuízos ecológicos.

Frente à ausência de estudos aprofundados e de conclusões mais claras, há uma necessidade de maiores investigações na área, quanto ao ciclo de vida dos biodigestores em si. No entanto, é inegável o potencial de utilizar-se biodigestores em áreas com baixo saneamento básico, pequenas fazendas ou até mesmo residências, para suprir o consumo de energia elétrica. Desta forma, será possível tratar resíduos como uma alternativa para a geração de energia e não apenas como um problema ambiental.

Frente ao exposto, resta esclarecido que o biogás é uma fonte de energia renovável com um enorme potencial e com crescimento notável nos últimos anos e que promete se tornar ainda maior com o passar do tempo e maiores investimentos em pesquisas na área. Sua versatilidade o torna um recurso de suma importância para o ambiente e para a sociedade, principalmente nas zonas rurais, mas não apenas. Portanto, apesar dos riscos existentes, os biodigestores possuem um grande potencial de produção e utilização.

REFERÊNCIAS

Alves, E. E. N.; INOUE, K. R. A.; Borges, A. C. **Uso de biodigestores na suinocultura**. NutriTime, v. 11, n. 5, p. 3714–3722, set./out. 2014. Disponível em: <http://www.nutritime.com.br>. ISSN 1983-9006.

Alves, E. E. N.; INOUE, K. R. A.; Borges, A. C. **Biodigestores: construção, operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais**. Setembro 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262565096_Biodigestores_construcao_operacao_e_usos_do_biogas_e_do_biofertilizante_visando_a_sustentabilidade_das_propriedades_rurais.

ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N. *et al.* **Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental**. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 4., 2002, Campinas. Anais... Disponível em:

http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100030&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 11 maio 2024.

Araújo, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia.

BEZERRA, K. L. P.; FERREIRA A. H. C.; CARDOSO E. de S.; MONTEIRO J.M.; AMORIM I. S.; JÚNIOR H. A. de S.; SILVA R. N. **USO DE BIODIGESTORES NA SUINOCULTURA**. NutriTime. Artigo 275 Volume 11 - Número 05– p. 3714– 3722 setembro/outubro 2014. Disponível em: www.nutritime.com.br. ISSN 1983-9006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2022. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 09 maio 2024.

CARVALHO, J. M. **Os benefícios da produção do biogás a partir de resíduos sólidos**, v. 14 n. 2 (2022): 14^a JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO IFSULDEMINAS.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. **Biodigestores. In: VI Semana de Tecnologia em Alimentos**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2008.

IBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Panorama do Biogás no Brasil 2022**. Disponível em: <https://cibiogas.org/>. Acesso em: 11 mai. 2024.

CORIOLETTI, N. S. D. *et al.* **Processos, tipos e usos de biodigestores, no tratamento de resíduos de origem animal**: Processes, types and uses of biodigestors, in the treatment of waste of animal origin. Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 7, p. 53775–53805, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n7-312.

CRISTIANO, D. M. Remoção de H₂S com óxido de ferro nanoestruturado para fins de purificação de biogás. 2015.

DEGANUTTI, R. *et al.* **Biodigestores Rurais: Modelos Indiano, Chinês e Batelada**. Trabalho apresentado no AGRENER 2004. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, São Paulo, 2004.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an Introduction**. 2nd edition. Germany: Wiley VCH, 2011.

DORNELAS, K. *et al.* **A biodigestão como ferramenta para a sustentabilidade avícola – uma revisão**. Research, Society and Development, v. 10, n. 12, e38101220042, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i12.20042.

FERREIRA, M. D. L. S. *et al.* **Estudo sobre a difusão do uso de biodigestores no Brasil e a experiência do projeto Dom Helder Câmara no Nordeste brasileiro**. Outubro 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/9162454/ESTUDO_SOBRE_A_DIFUS%C3%83O_DO_USO_DE_BIODIGESTORES_NO_BRASIL_E_A_EXPERI%C3%8ANCIA_DO_PROJETO_DOM_HELDER_C%C3%82MARA_NO_NORDESTE_BRASILEIRO.

GONÇALVES, G. L. F. **Biodigestores: uma alternativa para reduzir a contaminação das águas pelo esgoto**. 2-Mar-2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/VRNS-9RNMAC>.

JORGE, L. H. A.; OMENA, E. **Biodigestor. Dossiê Técnico.** SENAI/AM - Escola SENAI Antônio Simões, 2012.

JUNQUEIRA, S. L. C. D.; **GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ESTERCO BOVINO: ESTUDO DE CASO NA FAZENDA ATERRADO.** (2024)

KONS, F. L. **Análise técnica e econômica da geração de energia através de biodigestores em propriedade leiteira.** 2020. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/4193>.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato.** 2. ed.

NORMA ISO. NBR ISO 14040 - GA-ACV - **Princípios de estrutura.** Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5759669/mod_folder/content/0/NBR%20ISO%2014040%20-%20GA-ACV%20-%20Princ%C3%ADpios%20de%20estrutura.pdf?forcedownload=1.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (s.d.). **Guia prático do biogás – Geração e Utilização.** 2013. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf>

MIRANDA, J. I.; CHAIM, M. L.; SOUZA, K. X. S. de; VISOLI, M. C.; NAKA, J. **MIPWeb: uma aplicação Web dedicada à produção integrada de frutas.** Revista Brasileira de Agroinformática, v. 6, n. 1, p. 30-46, 2004. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/11>. Acesso em: 17 maio 2024.

RODRIGUES, N. S. *et al.* **Uso de biodigestores para impulsionar a sustentabilidade ambiental / Use of biodigestors to impulse environmental sustainability.** Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 1, p. 462–487, 2018. DOI: 10.34117/bjdv5n1-950.

SANTOS, E. L.; BARBOSA, J. H.; MELO, M. J.; PEREIRA JUNIOR, D. A.; MEDEIROS, C. S.; SANTOS, I. V. V. S. **Uma alternativa energética e ambientalmente sustentável ao agricultor familiar: dia de campo sobre biodigestores rurais.** 2017. Diversitas Journal, 2(1), 32–38. Disponível em: <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v2i4.489>

SILVA, L. A. *et al.* **Avaliação do ciclo de vida do processo biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia.** InterfacEHS - Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 10, n. 1, p. 125-140, 2015. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/25784>.

ZAGO, V. C. P.; BARROS, R. T. V. **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 2, p. 219–228, mar. 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019181376.