



LAVÍNIA DE SOUZA ANTÔNIO

**PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS PARA A
UTILIZAÇÃO COMO UMA FONTE DE
ENERGIA RENOVÁVEL**

**LAVRAS – MG
2023**

LAVÍNIA DE SOUZA ANTÔNIO

**PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS PARA A UTILIZAÇÃO COMO
UMA FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Castilla

Alvarez Orientador

LAVRAS - MG

2023

LAVÍNIA DE SOUZA ANTÔNIO

**PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS PARA A UTILIZAÇÃO COMO
UMA FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL**

**PURIFICATION OF BIOGAS FOR USE AS A SOURCE OF
RENEWABLE ENERGY**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 18 de julho de 2023

Prof. Dr. Dimas Jose Rua Orozco UFLA

Pof. Dr. Jessica De Oliveira Notorio Ribeiro UFLA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Castilla

Alvarez

Orientador

LAVRAS - MG

2023

Dedico esse trabalho à toda minha família que sempre me apoiou e incentivou a minha carreira, em especial aos meus avós Luzia, Maria Luíza e Luiz Antônio (*in memoriam*) que me ensinaram tanto sobre a vida e que hoje tenho certeza de que estão felizes por essa conquista no céu.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a realização de mais esse sonho a Deus, por me permitir viver tantas coisas boas, me dar força e coragem para enfrentar os desafios da vida e me manter firme durante todo esse ciclo.

À minha família, em especial meus pais, Rosimeire e Clenilson, que não mediram esforços para que eu conseguisse estudar e sempre me incentivaram a ser melhor a cada dia, lutando para me dar a melhor educação possível.

Ao meu namorado, Rener, que me apoiou durante toda a graduação e me ajudou a passar por todos os obstáculos encontrados durante o caminho. Aos meus amigos e colegas de faculdade, Nathália, Júlia, Alice, Eugênio, Ivana, Matheus e Yan por tornarem os dias de estudos mais fáceis e a vida universitária mais leve.

Gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio ao trabalho através do projeto de pesquisa APQ-01175-21 e ao meu orientador, Carlos, por todo o suporte durante a realização deste trabalho.

Agradeço também à Universidade Federal de Lavras por me proporcionar grande apoio durante toda a graduação, em especial ao seu Programa Institucional de Bolsas de Pesquisa – PIBIC/UFLA, de onde surgiu o interesse de realizar a pesquisa presente nesse trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que contribuíram para que esse dia chegasse e a todos que passaram pelo meu caminho durante essa trajetória, tudo o que vivi foi de suma importância para a realização desse sonho.

RESUMO

Atualmente, a maior parte da energia utilizada em escala mundial é proveniente de combustíveis fósseis e, embora cumpram muito bem a função energética, eles são fontes de energia não-renováveis que poluem o meio ambiente, fazendo-se necessário a busca por fontes alternativas de energia limpa. Uma alternativa é o uso de biogás, uma fonte renovável de energia que libera pouca quantidade gases poluentes para a atmosfera quando queimado, mas que precisa passar por uma purificação prévia para retirada de gases indesejados como o CO_2 e H_2S . Dessa forma, esta monografia teve o objetivo de realizar um estudo sobre os métodos de purificação do biogás e determinar a tecnologia de otimização com melhor custo-benefício de implementação. Para atingir os objetivos propostos foi realizado uma pesquisa qualitativa sobre os diferentes tipos de método de otimização, realizada uma comparação e seleção do método de purificação através de uma matriz de tomada de decisão, que levou em conta a eficiência de purificação, custo, complexidade e tempo de implementação e constatado que a lavagem com água é o método ideal para as condições impostas. Além disso, após a determinação do método mais eficiente, foi reativado e instrumentado um protótipo do método de purificação selecionado e variado a pressão da torre de lavagem e vazão da água para avaliar sua influência sobre a eficiência de purificação do biogás. Ao final do projeto, verificou-se que o método selecionado foi capaz remover grande quantidade de CO_2 presente no biogás e aumentar a quantidade de CH_4 . Além disso, o aumento da pressão da torre de lavagem contribuiu para um aumento da purificação do biogás e o aumento da vazão não ocasionou variação significativa na eficiência de purificação, sendo necessário uma análise para encontrar um ponto de equilíbrio entre razão de gás/água. Embora o método de purificação ter se mostrado eficiente, observou-se a necessidade de aumento da pressão da torre de lavagem e o controle da vazão da água e do ph para que o biogás seja transformado em biometano.

Palavras chave: Biogás. Purificação. Energia Renovável.

ABSTRACT

Currently, most of the energy used on a world scale comes from fossil fuels and, although they buy the energy function very well, they are non-renewable energy sources that pollute the environment, making it necessary to search for clean energy sources. An alternative is the use of biogas, a renewable source of energy that releases a small number of polluting gases into the atmosphere when burned, but which needs to undergo prior purification to remove undesirable gases such as CO₂ and H₂S. Thus, this monograph aimed to carry out a study on biogas purification methods and determine the optimization technology with the best cost-effective implementation. To achieve the proposed objectives, qualitative research was carried out on the different types of optimization method, a comparison and selection of the purification method was carried out through a decision-making matrix, which took into account the purification efficiency, cost, complexity and implementation time and the finding that washing with water is the ideal method for the imposed conditions. In addition, after the industrialization of the most efficient method, a prototype of the selected purification method was reactivated and instrumented, and the pressure of the washing tower and the water flow were varied to measure its influence on the efficiency of the biogas purification. At the end of the project, it was requested that the selected method was able to remove a large amount of CO₂ present in the biogas and increase the amount of CH₄. In addition, the increase in the pressure of the washing tower contributed to an increase in the purification of biogas and the increase in the flow rate did not cause a significant variation in the efficiency of purification, requiring an analysis to find a balance point between the gas/water ratio. Although the purification method proved to be efficient, it was observed that there was a need to increase the pressure in the washing tower and control the flow of water and pH so that the biogas is transformed into biomethane.

Keywords: Biogas. Purification. Renewable energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS.....	12
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
3.1	Biogás.....	13
3.1.1	Histórico.....	13
3.1.2	Produção de biogás.....	14
3.1.3	Composição e aplicação do biogás.....	18
3.2	Métodos de Purificação do Biogás.....	18
3.2.1	Separação por membrana.....	19
3.2.2	Separação Criogênica.....	21
3.2.3	Adsorção.....	22
3.2.4	Absorção.....	24
3.2.4.1	Absorção química.....	24
3.2.4.2	Absorção física.....	26
4	METODOLOGIA	29
4.1	Determinação da Pesquisa	29
4.2	Seleção de Informações	29
4.3	Definição do Melhor Método de Purificação	29
4.4	Implementação e testes do método de purificação	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6	CONCLUSÃO	47
7	TRABALHOS FUTUROS.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos e o crescimento populacional, a tecnologia se desenvolveu e o uso da energia para a realização de pequenos serviços e/ou criação de novos produtos se intensificou, aumentando a utilização de combustíveis fósseis e contribuindo para aceleração do aquecimento global e o agravamento do efeito estufa. Atualmente, o efeito da mudança climática global é considerado a maior ameaça ao futuro da humanidade pelos principais cientistas (GOMES; MORAIS; PASQUINI, 2019; FREDDO, 2017). Desde 2004, foram registrados os 10 anos mais quentes em âmbito mundial, sendo os cinco anos mais quentes no período de 2015 a 2020 com um aumento de 1,2°C da temperatura global em comparação com os tempos pré-industriais (antes de 1850). Dessa forma, se os gases de efeito estufa não forem reduzidos, projeta-se que a temperatura atingirá o nível de aumento de 1,5 °C dentro de 15 a 20 anos (ANGHEBEN, 2017; CERVEIRA, 2016).

Devido ao aumento do consumo de energia e outros recursos naturais, os ganhos obtidos com melhorias de eficiência no uso de recursos e expansão da produção de energia renovável estão se anulando. Além disso, os combustíveis fósseis dos quais o mundo ainda depende para mais de 80% de suas necessidades são finitos e serão esgotados criticamente dentro de 50 anos, tomando base os níveis de uso atuais (SPENCER, 2022; RITCHIE; ROSADO; ROSER, 2021). Esse cenário tem trazido grandes preocupações e sido palco de diversos debates, acordos e metas, sendo um deles o Acordo de Paris de 2015, assinado por 195 países para propor um compromisso mundial sobre as alterações climáticas e traçar metas para a redução da emissão de gases do efeito estufa. O Brasil assinou o Acordo de Paris comprometendo-se a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em até 37% (comparados aos níveis emitidos em 2005) até o ano de 2025, estendendo essa meta para 43% até 2030. As principais metas do governo brasileiro são: aumentar o uso de fontes alternativas de energia; aumentar a participação de bioenergias sustentáveis na matriz energética brasileira para 18% até 2030; utilizar tecnologias limpas nas indústrias; melhorar a infraestrutura dos transportes; diminuir o desmatamento; restaurar e reflorestar até 12 milhões de hectares (NEOENERGIA, 2023).

Além do Acordo de Paris, em outubro de 2018, o IPCC (*Intergovernmental*

Panel on Climate Change) alertou que as emissões de CO₂ devem ser reduzidas em 45% em relação aos níveis de 2010 até 2030 e atingir zero líquido até 2050 para conter o aumento da temperatura global em 1,5 °C (MAIA et al., 2015). Para isso, alguns especialistas propuseram mudanças rápidas e generalizadas na economia mundial envolvendo uso de energia, uso da terra, transporte, indústria, agricultura e construção (HEINBERG; FRIDLEY, 2016). Como essas mudanças seriam muito perturbadoras para a economia mundial altamente globalizada, uma abordagem menos drástica com foco no desenvolvimento de energias renováveis e melhorias na eficiência energética foi enfatizada desde o Acordo de Paris de 2015 pelos principais emissores de CO₂ (China, Estados Unidos, União Europeia, Japão, Rússia, Índia, Brasil) (HICKEL; KALLIS, 2019). Diante disso, a busca por fontes de energias alternativas se tornou um desafio, sendo necessário explorar as diferentes formas de obtenção de energias renováveis como a eólica, fotovoltaica, hidrelétrica e as energias obtidas através da conversão de biomassa.

Uma fonte alternativa promissora para suprir as necessidades ambientais e energéticas e contribuir para a diminuição de emissão de CO₂ é o biogás, biocombustível produzido a partir decomposição de biomassa. A energia produzida através da biomassa pode ser convertida em eletricidade, combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, sendo um dos biocombustíveis mais sustentáveis existentes (FREDDI, 2017). A biomassa utilizada para produção do biogás pode ser encontrada na natureza: como a lenha, resíduos gerados pelas culturas agrícolas, agroindústrias e criação animal, florestas energéticas e resíduos sólidos municipais, tornando o Brasil favorável à utilização desse tipo de fonte alternativa de energia, uma vez que o país possui vasta área agroindustrial em plena expansão (AFONSO et al., 2004).

O biogás bruto é produzido em condições anaeróbicas pela decomposição da fração orgânica dos resíduos com o auxílio de micróbios e enzimas, sendo constituído, geralmente, por uma mistura de CH₄ (40-65% v/v), CO₂ (35-55% v/v), e uma quantidade residual de H₂S (0,1–3% v/v), umidade e compostos orgânicos voláteis adicionais (VOCs) (ANGELIDAKI et al., 2018), possuindo um valor energético de 37,3 MJ/m³, e um valor calórico de cerca de 4740-7500 kcal/m³ (KORBAG et al., 2020). A produção de biogás inclui uma sequência de fases bioquímicas complexas (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) dependente de várias variáveis físicas, químicas e biológicas, como matérias-primas (MU et al., 2020), tecnologias de pré-

tratamento, pH, temperatura e diversidade microbiana anaeróbia (KUMAR et al., 2016).

Embora o biogás seja uma fonte de energia renovável e sustentável, a presença de CO₂ e H₂S em sua composição causam problemas na sua utilização direta, uma vez que o CO₂ é um gás que contribui para o aquecimento global e o H₂S é um gás corrosivo e prejudicial à saúde humana, se fazendo necessário sua purificação (CERVEIRA, 2016). Além das questões ambientais, a remoção do CO₂ faz com que a porcentagem de CH₄ no biogás se eleve, tornando seu poder calorífico maior e aumentando sua eficiência energética, transformando-o em um Gás Natural Substituto (GNS), chamado de biometano e podendo ser classificado como uma fonte de energia renovável.

Atualmente, existem diversas formas de realizar a purificação do biogás, entretanto nem todas são economicamente viáveis. A partir disso, esse trabalho tem como objetivo a realização de um estudo sobre os principais métodos de purificação existentes do biogás e a seleção e aplicação da tecnologia mais eficiente e com melhor custo-benefício, levando em consideração eficiência de purificação, custos, complexidade e tempo de implementação.

2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo analisar, selecionar e implementar o método de purificação de biogás com melhor custo-benefício.

Para cumprir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma pesquisa qualitativa sobre os principais métodos de purificação do biogás;
- Elaborar uma matriz de tomada de decisão levando em consideração critérios de custo, tempo, complexidade de implementação e eficiência de purificação;
- Implementar o método de purificação mais eficiente definido de acordo com a matriz de tomada de decisão;
- Testar experimentalmente o método de purificação selecionado;
- Analisar variáveis que influenciam na purificação do biogás.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Conforme descrito anteriormente, a purificação de biogás é crucial para evitar o aumento da poluição atmosférica, do agravamento do efeito estufa e diminuir a incidência de corrosões, desgaste mecânico dos equipamentos e, principalmente, para aumentar a sua qualidade e seu poder calorífico. Sendo assim, se faz necessário a remoção do CO₂ e H₂S que podem acarretar problemas ao equipamento e perda de qualidades (PETERSSON et al., 2009).

A partir da literatura, é possível descrever melhor o biogás e os seus métodos de purificação. Sendo assim, esta seção será dividida em dois tópicos, o primeiro trará uma abordagem sobre o marco teórico e conceitos do biogás dividido em definição, histórico, formação, composição e aplicações e o segundo um estado da arte apresentando as metodologias de purificação de biogás existentes.

3.1 Biogás

O biogás é um biocombustível constituído de uma mistura de gases, principalmente metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), produzido a partir da digestão anaeróbia de microrganismos. A matéria prima utilizada para sua produção pode ser biomassa de origem animal ou vegetal como restos de comida, dejetos de animais, lama e resíduos de esgoto, onde a liberação dos gases que o constituem acontece quando os microrganismos consomem essa biomassa em ambientes fechados e sem a presença de oxigênio (SAHOTA et al., 2018).

3.1.1 Histórico

O Biogás surgiu por volta dos anos 1600 quando foi identificado uma substância inflamável desconhecida em regiões de pântano e em 1667 foi descoberto pelo cientista Thomas Shirley no Reino Unido. Depois de um século após a descoberta, a composição química do biogás foi qualificada e a identificação da presença de metano foi realizada pelo físico italiano Alessandro Volta. A sua utilização como combustível se iniciou em 1857, com a aplicação em sistemas de aquecimento e iluminação urbana sugerida por Louis Pasteur (CIBIOGÁS, 2023).

Apesar da utilização mundial de biogás começar na década de 50, a utilização do biogás no Brasil se deu somente em 1979 devido à crise do petróleo, onde novas fontes de energia foram exploradas. Em 1982, o governo federal lançou o Programa de Mobilização Energética, que descreve ações direcionadas à conservação de energia e à substituição dos derivados do petróleo, citando o biogás como um combustível alternativo e, somente entre as décadas de 90 e 2000 o biogás foi realmente difundido no país com grande incentivo governamental e privado, devido à crise energética dos combustíveis fósseis e a busca crescente por fontes alternativas de energia limpa. A partir de então, a produção de biogás no Brasil só cresceu, com implementações de grande quantidade de biodigestores e programas de incentivo como a criação do Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), o programa RenovaBio e tratados com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) para a utilização do biogás para produção de energia elétrica (CIBIOGÁS, 2023).

Dados divulgados pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), em novembro de 2020, demonstram que a disponibilidade de biogás no Brasil está crescendo a uma média de 40% ao ano desde 2010 (CIBIOGÁS, 2020), totalizando, em 2019, aproximadamente 269 mil toneladas equivalentes de petróleo (tep), contra 204 mil no ano anterior (BEN, 2020). Atualmente, o Brasil conta com 638 usinas de biogás em operação que destinam seu uso para a produção de energia térmica, elétrica, mecânica e produção de biometano/GNV. Os substratos utilizados para biodigestão provem principalmente de fontes industriais, agropecuárias, de resíduos sólidos urbanos ou efluentes de estações de tratamento de esgoto (CIBIOGÁS, 2023).

3.1.2 Produção de biogás

O biogás é gerado a partir da digestão anaeróbica de diferentes tipos de matéria orgânica, sendo constituído do somatório de diferentes processos químicos e biológicos pelos quais a matéria orgânica passa para liberação de gás. O processo de produção de biogás constitui em uma quebra sistemática de grandes polímeros orgânicos pela ação anaeróbica de diferentes microrganismos em moléculas menores que envolve os processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese (AMIGUN; VON BLOTTNITZ, 2007).

O processo de hidrólise é realizado por bactérias fermentativas, nessa etapa

grandes moléculas com estruturas complexas são quebradas em pequenas moléculas de estrutura simples, solúveis em água. Carboidratos transformam-se em açúcares e monômeros, proteínas em aminoácidos e lipídios em ácidos graxos.

A acidogênese é realizada também pelas mesmas bactérias da etapa de solubilização, a partir dessas pequenas moléculas orgânicas simples são gerados ácidos orgânicos de cadeia pequena como propionato, butirato, e outros compostos como dióxido de carbono, ácido sulfídrico, hidrogênio gasoso, etanol e amônia.

Na acetogênese há dois grupos de bactérias responsáveis por essa etapa. As bactérias acetogênicas consumidoras de hidrogênio produzem acetato a partir de dióxido de carbono e hidrogênio gasoso e as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio geram acetato mediante utilização dos ácidos orgânicos.

Na metanogênese há dois grupos de bactérias atuantes: as bactérias metanogênicas acetoclásticas, que produzem o acetato e as bactérias metanogênicas hidrogenotróficas que produzem o dióxido de carbono e hidrogênio gasoso.

Na sulfetogênese atuam bactérias redutoras, que utilizam compostos sulfurados, como sulfato e sulfito, para oxidar compostos orgânicos simples, gerando ácido sulfídrico e dióxido de carbono.

Portanto, o processo é resultado de micróbios que se alimentam da matéria orgânica na forma de proteínas, carboidratos e lipídios/gorduras, cuja digestão leva à produção de gases principalmente na forma de metano e dióxido de carbono.

Para a produção em média e grande escala de biogás são utilizados biodigestores, onde a biomassa hidratada é armazenada para que ocorra a digestão anaeróbia das bactérias que possuem a finalidade de acelerar o processo de decomposição orgânica. O biodigestor pode ser definido como um tanque fechado com forma, tamanho e material variáveis, em que são armazenados resíduos orgânicos misturados com água que se decompõe na ausência de ar e geram biogás (FERREIRA; SILVA, 2009).

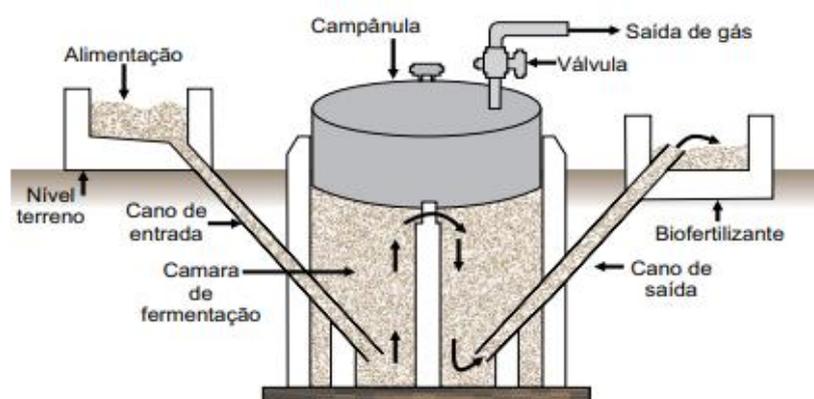
Atualmente existentes diversos tipos de biodigestores que são utilizados de acordo com a necessidade de cada aplicação, dentre eles, temos os principais modelos:

Biodigestor de Modelo Indiano

Esse tipo de biodigestor é enterrado no solo, mostrado na Figura 1, possui uma

campânula móvel de ferro, que pode estar mergulhada na biomassa ou em um selo d'água externo e é responsável pela manutenção da pressão interna do sistema, expandindo quando o biogás produzido não é consumido (DEGANUTTI et al., 2002). Ele possui uma parede no meio que possibilita a movimentação da biomassa por todo o biodigestor. De construção simples, a matéria orgânica utilizada na sua alimentação deve ser diluída em água e concentração de sólidos totais não superior a 8% para que não ocorra entupimentos e a alimentação deve ser contínua (TARRENTO; MARTINEZ, 2006).

Figura 1 - Biodigestor de modelo Indiano.

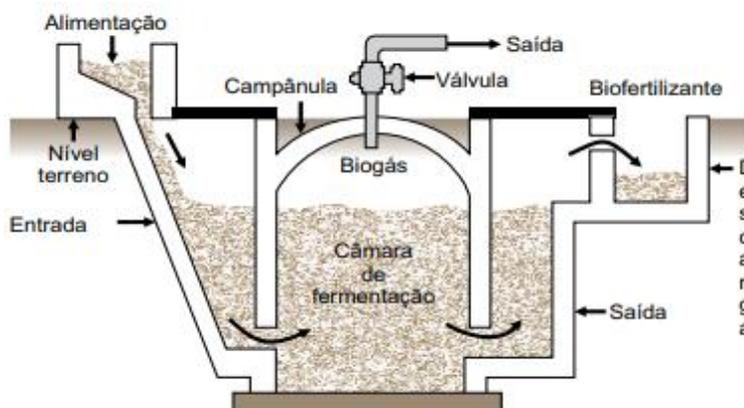


Fonte: CASSINI; COELHO; PECORA (2014).

Biodigestor de Modelo Chinês

Mostrado na Figura 2, este tipo de biodigestor é semelhante ao modelo Indiano, entretanto para torná-lo mais viável economicamente, não é utilizado a campânula de metal, sendo construído quase totalmente em alvenaria com o teto impermeável para armazenar o biogás. Seu funcionamento acontece com base no princípio da prensa hidráulica, fazendo com que a pressão mude com o tempo (JORGE; OMENA, 2012). Embora seja mais barato que o modelo Indiano, esse tipo de biodigestor não é mais benéfico, visto que caso a vedação não seja boa, pode ocorrer vazamento de biogás (TARRENTO; MARTINEZ, 2006).

Figura 2 – Biodigestor de modelo Chinês.

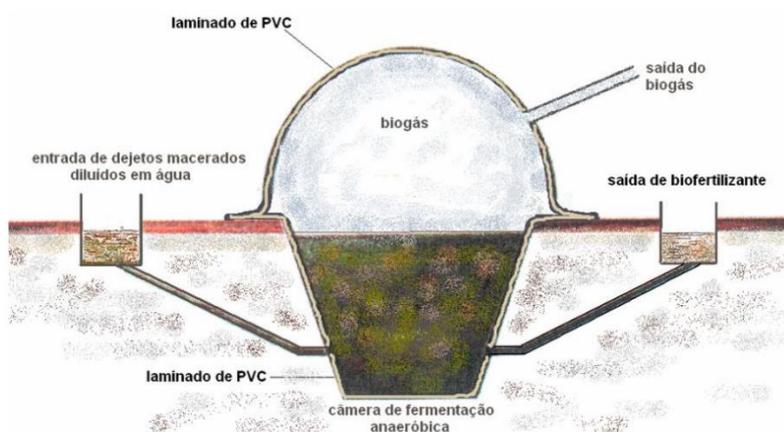


Fonte: CASSINI; COELHO; PECORA (2014).

Biodigestor Modelo Canadense

Esse tipo de biodigestor, mostrado na Figura 3, é um modelo horizontal, onde sua largura é maior que a profundidade, possuindo maior exposição ao sol e conseqüentemente maior produção de biogás (CASTANHO; ARRUDA, 2008). Sua cúpula é de plástico maleável, tipo PVC, que infla com a produção de gás. Este biodigestor precisa ser totalmente vedado e pode ser abastecido de forma contínua ou por batelada (OLIVER, 2008).

Figura 3 – Biodigestor de modelo Canadense.



Fonte: HAACK (2009).

3.1.3 Composição e aplicação do biogás

Os principais componentes do biogás são o metano e o dióxido de carbono, tendo ainda a presença de alguns compostos como sulfeto de hidrogênio, oxigênio gasoso, nitrogênio gasoso e água. A composição do biogás varia de acordo com o tipo de matéria-prima utilizada para a sua produção, mas em geral, a porcentagem em volume de gases que constituem o biogás bruto são 50-75% de CH₄, 25-50% de CO₂, 0-10% de N₂, 0-3% de H₂S, 0-1% de H₂ e vestígios de outros gases (NOORAIN et al., 2018).

Pela sua alta quantidade de metano, o biogás tem grande capacidade energética e pode ser utilizado em diversas aplicações, como combustível para motores de combustão interna, em processos que envolvem calor, secagem, iluminação a gás, queima em caldeiras, tratamento de chorume, entre outras aplicações que auxiliam na redução de descarte de lixo doméstico, lodo da cidade e outros resíduos e desempenham um papel positivo na diminuição do efeito estufa. E, embora o biogás tenha grande conteúdo energético, para ser utilizado como combustível renovável ele precisa passar por um processo de purificação para a retirada de CO₂ e H₂S, visto que esses gases são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, causam a diminuição da eficiência energética do biogás e podem danificar motores e tanques de armazenamento do biogás (NOORAIN et al., 2018).

A purificação do biogás tem dois objetivos principais: (i) remover os componentes que possam danificar o sistema de gás, (ii) remover o CO₂ para que o poder calorífico do metano seja ajustado a fim de atender às especificações para cada aplicação. De acordo com MUNOZ et al, para o biogás ser utilizado como energia limpa, ele deve conter de 95 a 97% de CH₄ e 1 a 3% de CO₂ (MUNOZ et al., 2015).

3.2 Métodos de Purificação do Biogás

Atualmente existem diversas técnicas para remoção de CO₂ e H₂S, como separação por membrana, separação criogênica, adsorção e absorção (química e física), como veremos a seguir:

3.2.1 Separação por membrana

A técnica de separação por membrana é amplamente utilizada na natureza da indústria de gás para remoção de impurezas (BAENA-MORENO et al., 2020), e seu uso pode ser estendido para a purificação do biogás. Esse método é baseado nas propriedades de permeação seletiva de uma membrana, como separação gás-gás ou separação gás-líquido (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011). No princípio de permeação seletiva, os gases dissolvem-se rapidamente em materiais poliméricos e são transportados através da membrana quando ocorre uma diferença de pressão entre os dois lados (SAHOTA et al., 2018a).

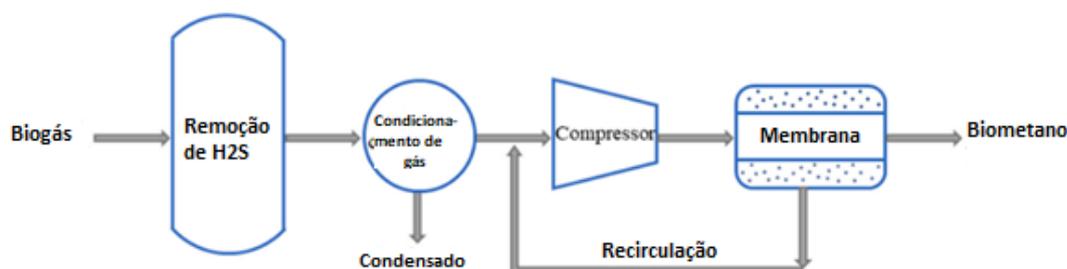
A eficácia de purificação do método de separação por membrana depende da forma e o material da membrana e os três tipos comumente usadas nas indústrias são de fibra oca, membranas enroladas em espiral e membranas do tipo envelopado (SCHOLZ; MELIN; WESSLING, 2013). Dentre esses tipos, destaca-se a membrana produzida por fibras ocas devido à sua maior área superficial efetiva por unidade de volume (CARREON et al., 2018).

Em termos do tipo de material, as membranas podem ser categorizadas como membranas inorgânicas, poliméricas ou orgânicas e compostas. Membranas mais comerciais são compostas de polímeros feitos de materiais orgânicos, que exibem uma excelente resistência mecânica e alta permeação seletiva, possuindo baixo custo de fabricação. Comparado com membranas poliméricas, as membranas inorgânicas exibem maior resistência térmica e estabilidade química, maior desempenho de separação e maior vida útil (SAHOTA et al., 2018a). No entanto, as membranas inorgânicas possuem maior custo e complexidade de implementação do que as membranas poliméricas, possuindo uma estrutura descontínua e defeituosa (CHEN et al., 2015).

O princípio da purificação do biogás por separação por membrana corresponde ao princípio de funcionamento de uma peneira, onde alguns componentes do biogás podem ser transportados através de uma membrana fina enquanto outros ficam retidos, baseando nos diferentes tamanhos de partícula das moléculas de gás a serem separadas e diferentes afinidades químicas para diferentes membranas (PETERSSON et al., 2009). Devido aos diferentes tamanhos de partículas de moléculas de gás e propriedades de membrana, as membranas exibem diferentes seletividades e permeabilidades para diferentes gases (OLAJIRE, 2010a). Quando o gás é alimentado de um lado da

membrana, uma diferença de pressão é gerada em ambos os lados, permitindo que o gás seja transportado (CHEN et al., 2015). Os gases altamente solúveis de moléculas pequenas, como hidrogênio, H_2S e CO_2 presentes no biogás se dissolvem e se difundem através da membrana a uma taxa mais alta do que CH_4 devido à diferença de pressão (PETERSSON et al., 2009; SAHOTA et al., 2018a). Sendo assim, durante a purificação do biogás, o CO_2 passa através da membrana, enquanto CH_4 é bloqueado e retido na entrada. O processo de purificação e a atualização de biogás por tecnologia de membrana é mostrada na Figura 4 (KHAN et al., 2017). Nesse método é necessário remover o H_2S do biogás em uma etapa anterior para evitar que ele prejudique o desempenho da separação da membrana.

Figura 4 – Processo de purificação de biogás pelo método de separação por membrana.



Fonte: KHAN et al., adaptado (2017).

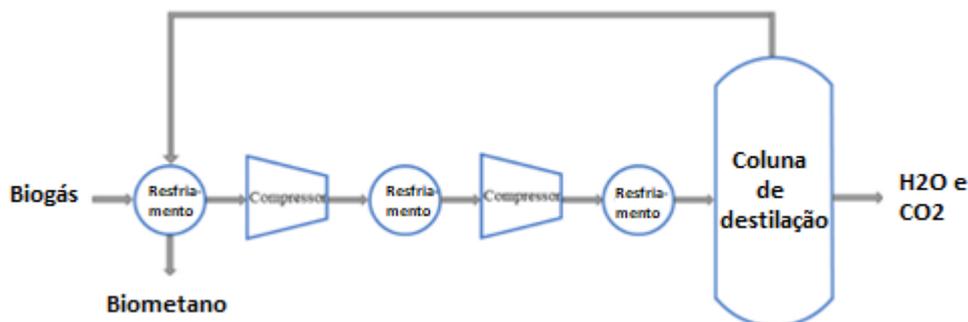
De forma geral, esse método é capaz de realizar a purificação do biogás com alta quantidade de metano. Esse tipo de tratamento permite a separação dos constituintes do biogás e não depende da concentração de compostos orgânicos voláteis. Uma vantagem desse método é que o processo de tratamento é feito com um sistema compacto e leve, requerendo menos manutenção. Uma das maiores desvantagens do processo de tratamento do biogás usando membranas está relacionada aos custos elevados devido à necessidade de uma unidade de pré-tratamento para remoção de poluentes e uma unidade adicional para remoção de umidade. Além disso, o tempo de implementação desse sistema é alto e os danos causados por vibrações entre membrana e partículas sólidas ainda são um desafio. Dessa forma, esta técnica é mais recomendada quando se pretende atingir biometano com alto grau de pureza. Outra desvantagem desse método é a seleção da membrana que mais se adequa à aplicação, sendo necessário um estudo prévio levando em consideração as variáveis e necessidades do sistema e aplicação

(SHAH et al., 2021).

3.2.2 Separação Criogênica

O método de purificação por separação criogênica é baseado no princípio da liquefação de diferentes gases em diferentes pressões e temperaturas. O ponto de ebulição de CH_4 a 1 atm ($-161,5\text{ }^\circ\text{C}$) é menor que o do CO_2 ($-78,2\text{ }^\circ\text{C}$), sendo assim, nesse método de purificação o biogás passa por múltiplos estágios de compressão, como mostrado na Figura 5, onde é resfriado a uma temperatura baixa o bastante para que o CO_2 seja condensado ou sublimado e separado do composto (ANDRIANI et al., 2014b). Além de disso, devido à presença de H_2S e água no biogás, ele deve ser tratado previamente para evitar a formação de gelo que podem levar ao entupimento dos equipamentos (CHEN et al., 2015; KHAN et al., 2017; SAHOTA et al., 2018a).

Figura 5 – Processo de purificação de biogás pelo método de separação criogênica.



Fonte: KHAN et al., adaptado (2017).

Embora a separação criogênica em baixas temperaturas possa produzir biometano (aproximadamente 99% de pureza), o processo extenso uso de equipamentos como trocadores de calor, colunas de destilação, turbinas e compressores (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011). Portanto, este processo consome uma quantidade considerável de energia para garantir resfriamento e solidificação de CO_2 , o que leva ao aumento dos custos operacionais e de capital (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011; SONGOLZADEH et al., 2014). Para resolver o entupimento de dutos causado por

congelamento de CO₂, YOUSEF et al. (2018) concluíram que a pressão de destilação e temperatura e taxa de refluxo podem ser aumentadas para aliviar o risco de congelamento.

Como a tecnologia de purificação de biogás por separação criogênica é recente, ela ainda está em desenvolvimento em laboratório e necessita de mais estudos. A vantagem deste método é a baixa perda de metano durante o processo, entretanto, a grande probabilidade de congelamento do CO₂ pode causar problemas cruciais como bloqueios de tubos devido ao processo de resfriamento. Além disso, a tecnologia necessita de um pré-tratamento para limpeza do biogás e retirada de impurezas (SHAH et al., 2020).

3.2.3 Adsorção

A adsorção é um processo físico-químico que consiste na transferência de uma ou mais substâncias, presentes em meio gasoso ou líquido, para a superfície de um substrato sólido. Ela se dá pela adesão de moléculas, átomos ou íons na interface ou superfície de um adsorvente. Este método ocorre devido à existência de forças atrativas no substrato sólido (adsorvente) que atraem o soluto (adsorbato) para a zona de interface (THOMMES et al, 2015).

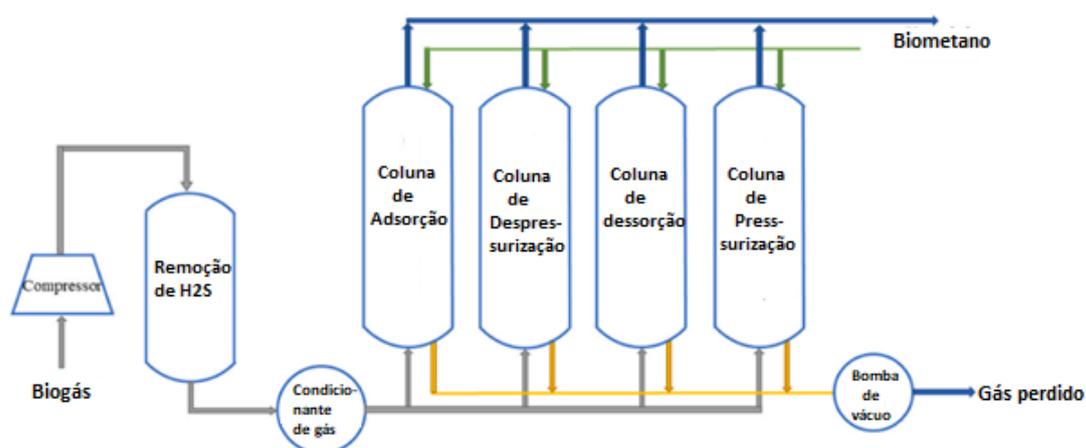
A eficiência da purificação desse método depende diretamente do adsorvente utilizado e para ser um bom adsorvente é necessário que ele apresente uma grande área de superfície e poros grandes o suficiente para permitir a entrada do adsorbato e pequeno o bastante para não adsorver substâncias de interesse, como o metano. Os principais adsorventes utilizados são: carvão ativado, zeólitos, titanossilicatos, sílicagéis e peneiras moleculares de carbono (THOMMES et al, 2015).

Para a purificação do biogás, o CO₂ é removido por meio da adsorção com diferentes pressões. O biogás entra no fundo do reservatório em direção ao topo, o material adsorvente retém o CO₂ e ao final do processo se obtém o biogás purificado com certa pureza, dependendo do adsorvente utilizado. As moléculas adsorventes são retidas em poros do material adsorvente e a separação acontece devido ao tamanho dos poros e tempo de retenção das diferentes moléculas (THOMMES et al, 2015).

A metodologia mais conhecida e utilizada é a PSA (*Pressure Swing Adsorption*), pois possui maior eficiência comparada a outras técnicas de adsorção. A tecnologia de adsorção por oscilação de pressão (PSA) pode ser dividida em adsorção de oscilação de

vácuo, adsorção de oscilação de temperatura e adsorção elétrica oscilante (ADNAN et al., 2019). Um material adsorvente é usado e, seletivamente, adsorve e desorve componentes de gás indesejados sob variações de pressão para conseguir a separação da mistura gasosa (AUGELLETTI et al., 2017). Em geral, o processo de separação PSA de misturas gasosas consiste em quatro etapas: adsorção, descompressão, dessorção e pressurização (FIGURA 6) (AWE et al., 2017). Uma pressão mais alta corresponde a uma maior adsorção de gás (Andriani et al., 2014).

Figura 6 – Processo de purificação de biogás pelo método de separação por adsorção.



Fonte: KHAN et al., adaptado (2017).

Dependendo da afinidade de diferentes materiais de adsorção para moléculas de gás com diferentes propriedades, zeólita, carvão ativado e peneiras moleculares podem ser usadas para separar CO₂, O₂ e N₂ do gás em um sistema PSA. Como as moléculas de CH₄ são maiores que as de outros gases, o CO₂ pode ser seletivamente adsorvido em adsorventes porosos com uma grande área de superfície específica, permitindo a separação de CO₂, N₂, O₂ e H₂S da corrente de gás e aumentando a concentração de CH₄ no biogás (BAENA-MORENO et al., 2019).

Em aplicações comerciais, o PSA é o método mais comumente usado devido ao seu baixo consumo de energia e alta segurança e eficiência em comparação com outros métodos de separação de gases. No entanto, o método exibe recuperação limitada de CH₄ porque uma parte do CH₄ é perdida com o gás residual (ou seja, fluxos de gás

residual consistindo principalmente de CO₂, mas com alto teor de CH₄). Portanto, é necessário um tratamento adicional do gás residual em vez de sua liberação direta para a atmosfera (SAHOTA et al., 2018a). Para superar esse problema e obter CO₂ altamente puro, Augeletti et al. (2017) usaram zeólita 5A como adsorvente e uma unidade PSA dupla para adsorção e alcançou uma recuperação de CH₄ de mais de 99%.

Esse tipo de tecnologia possui baixo custo, operação simples e flexibilidade para se adequar à demanda de oferta variável e a desvantagem é que para fazer a purificação de CO₂ e H₂S é necessário a realização de dois ciclos utilizando dois adsorventes diferentes, uma vez que afinidade das impurezas muda de acordo com o tipo de adsorvente utilizado (JIANG et al., 2018).

3.2.4 Absorção

A absorção é um método físico ou químico que envolve o contato entre uma mistura gasosa e um solvente líquido não volátil, de maneira a promover a transferência de um componente da fase gasosa para a fase líquida. Consiste na operação inversa a dessorção, empregada quando se deseja transferir compostos voláteis na mistura líquida para a fase gasosa. Os processos de absorção são realizados em colunas, cujo interior é preenchido com dispositivos de contato e adicionado o item que será utilizado para purificar o biogás. Dessa forma, nesse tipo de purificação, é extremamente importante a seleção dos equipamentos, a estimativa das condições de operação, diâmetro e altura da torre, perda de carga e a seleção de um solvente adequado (THOMMES et al, 2015). Dentre a absorção, temos a classificação em:

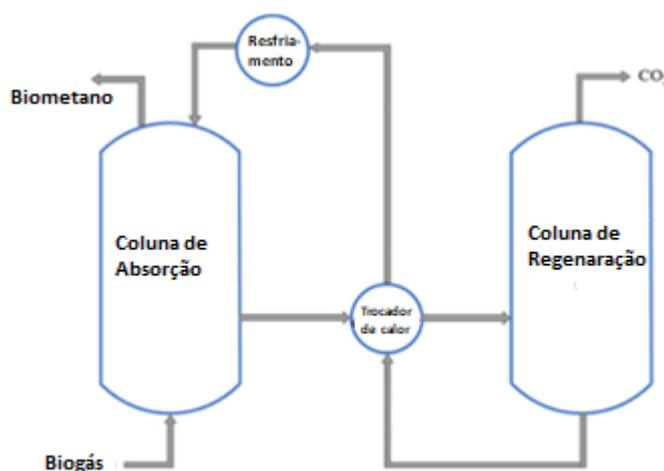
3.2.4.1 Absorção química

A absorção química é uma tecnologia eficiente para a remoção de CO₂ e H₂S da mistura gasosa em que ocorre uma reação química entre o gás e o solvente. Em uma coluna de absorção, os gases poluentes reagem com a solução aquosa e são transferidos do gás para a interface gás/líquido, e depois para a maior parte da fase líquida, onde ocorrem as reações. Dentro desse tipo da absorção, a escolha do reagente deve ser levada em conta para uma melhor eficiência de remoção e os que mais se destacam são a água, soluções aquosas de NaOH, KOH, aminas e sais aminoácidos (ROCHELLE,

2016).

Para ocorrer a purificação do biogás nesse método, o soluto absorvido reage com o solvente em uma reação química reversível. Na tecnologia de purificação de aminas, o CO_2 ácido no biogás é absorvido através de uma reação de neutralização ácido-base com um solvente alcalino onde produtos intermediários são obtidos. A decomposição dos produtos intermediários por aquecimento produz o solvente original também como CO_2 puro (SAHOTA et al., 2018a). A Figura 7 ilustra o fluxo do processo.

Figura 7 – Processo de purificação de biogás pelo método de separação por absorção química.



Fonte: KHAN et al., adaptado (2017).

O biogás, que é injetado por baixo, flui para cima na unidade. O gás é depurado por um solvente contendo amina que flui do topo para o fundo, e o biometano é retirado de cima. A solução com gás ácido dissolvido é introduzida a partir do fundo da coluna do depurador ao trocador de calor para aquecimento a $80\text{ }^\circ\text{C}$ antes de entrar na coluna para regeneração (METZ et al., 2005; WANG et al., 2011; Vilardi et al., 2020b). É preferível remover o H_2S do biogás antes do processo porque H_2S pode ser absorvido pela solução de amina, necessitando de dessorção de alta temperatura (OLAJIRE, 2010a). Os solventes comumente usados são dietanolamina (DEA), monoetanolamina (MEA), e metil dietanolamina (MDEA) (XIAO et al., 2013; KHAN et al., 2017). Embora o MEA responda melhor ao CO_2 do que o MDEA, MDEA exibe uma maior capacidade de absorção de CO_2 com baixo custo de energia (OLAJIRE, 2010; WANG

et al., 2011; SONGOLZADEH et al., 2014). Este método pode ser usado para absorver CO_2 para obter CH_4 com >99% de recuperação. No entanto, a regeneração da solução de amina requer uma quantidade considerável de calor, e o processo tem um alto custo de investimento (KHAN et al., 2017).

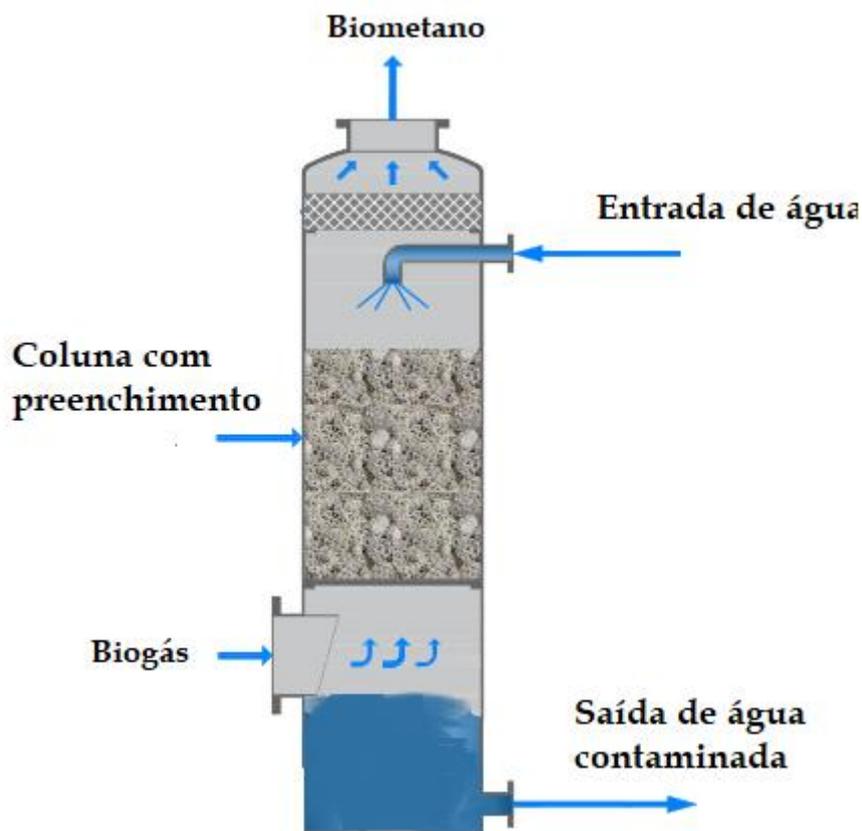
3.2.4.2 Absorção física

A absorção física é uma tecnologia para remoção de CO_2 do biogás que consiste na passagem do gás para a fase líquida sem a ocorrência de reação química. Ou seja, nesse tipo de purificação, deve ser levado em conta a transferência de massa que ocorre entre a água e o biogás (SUN et al., 2015)

Dentre o método de absorção física, podemos destacar o método de lavagem com água, um método mais simples de purificação do biogás que utiliza somente a água como reagente para a retirada simultânea de CO_2 e H_2S . Nesse método, o biogás é pressurizado e introduzido no fundo da torre de lavagem enquanto a água é pulverizada em forma de gotículas no topo da torre. Dentro da torre é colocado material de preenchimento para aumentar a área de contato entre biogás e água para a remoção ser mais eficiente e, enquanto o biogás se move em direção ascendente na torre, a água se move descendente, contracorrente, fazendo com ocorra o contato e o CO_2 e H_2S sejam removidos. Depois da ocorrência do contato entre biogás e água, o biogás sai por um local na parte superior da torre, enquanto a água contaminada é eliminada pela parte inferior, podendo ser reciclada e usada novamente no processo de purificação (XIAO et al., 2014).

A lavagem com água é uma tecnologia de atualização de biogás amplamente utilizada devido ao seu baixo impacto ambiental, facilidade de uso, baixo índice de perda de CH_4 , baixo custo de capital e operacional, simplicidade e de fácil manutenção e sem necessidade de pré-tratamento (o pré-tratamento é necessário apenas sob altos teores de H_2S) (COZMA et al., 2015). Como a solubilidade em água do CO_2 e do H_2S é maior do que a do CH_4 , lavagem com água de alta pressão pode ser realizada para absorver ambos CO_2 e H_2S para obter CH_4 enriquecido (95–97%) (KHAN et al., 2017). A Figura 8 mostra o esquema de um sistema simples de lavagem com água pressurizada.

Figura 8 – Processo de purificação de biogás pelo método de separação por absorção física.



Fonte: SCRUBBING TOWERS, adaptado (2023).

O processo de lavagem com água pode ser dividido em duas etapas: A primeira coluna pertence a um lavador de alta pressão (absorvedor), no qual o biogás entra pelo fundo e flui para cima, a água flui de cima para baixo para entrar em contato com o fluxo de gás, e o CH_4 purificado é recuperado do topo. A segunda coluna é uma coluna de dessorção de baixa pressão, na qual o solvente é regenerado e CO_2 e H_2S são removidos e recuperados por lavagem com água quase à pressão atmosférica (NAPWS) (ANGELIDAKI et al., 2018; VILARDI et al., 2020). Quando altas concentrações de H_2S estão presentes na corrente de gás, ele deve ser removido com antecedência para evitar a solubilidade reduzida de CO_2 e afetar a eficiência do processo e a corrosão da tubulação por solventes de baixo pH (VILARDI et al., 2020). Embora esse processo seja ecologicamente correto e eficiente, sem requisitos químicos especiais, necessita em altos custos de investimento e operação. Além disso, o processo de regeneração da água

consome muita energia e é caro (EZE; AGBO, 2010; KHAN et al, 2017).

De acordo com Abdeen et al (2016), operando a baixas pressões e utilizando coluna empacotada, é possível observar uma purificação de cerca de 98% do metano com método de lavagem com água, sendo classificado como um método de fácil implementação e baixo custo (ABDEEN et al, 2016).

Segundo Masebinu, Aboyade e Muzenda (2014) a absorção química emite gases nocivos e de efeito estufa em geral, pois são projetados em ambiente aberto e utilizam solventes químicos e a técnica de lavagem com água é considerada a tecnologia menos poluente em termos de emissão de gases com efeito estufa, uma vez que utiliza apenas água para realizar a purificação (MASEBINU; ABOYADE; MUZENDA, 2014). Além disso, o método de lavagem com água também é considerado um dos mais confiáveis devido a muitas características vantajosas, como investimentos de baixo custo operacional e de capital (SAHOTA et al, 2018). Uma desvantagem desse método é a geração de líquidos contaminados com CO_2 e H_2S , sendo necessário um tratamento adicional antes do descarte. Além disso, o sistema de lavagem de água requer manutenção frequente e mão de obra qualificada para operação.

4 METODOLOGIA

Nesta seção será abordado como este trabalho foi realizado. O primeiro passo foi a determinação da pesquisa, de onde os dados foram obtidos e o período que ela ocorreu, o segundo foi a análise das informações mais relevantes, o terceiro passo foi a determinação do melhor método de purificação e por último a implementação do protótipo do método escolhido.

4.1 Determinação da Pesquisa

A fim de levantar informações de diferentes pontos de vista, a pesquisa foi realizada em acervos literários, incluindo artigos, livros, sites e manuais que continham informações sobre o biogás e seus métodos de purificação. O período de realização da pesquisa foi entre julho de 2022 e julho de 2023, e as referências utilizadas para levantamento de dados e informações foram selecionadas de acordo com a sua relevância histórica para o projeto. Além disso, foram utilizadas informações com as datas de 2002 a 2023 para uma melhor comparação e verificação da evolução dos métodos de purificação.

4.2 Seleção de Informações

Após a realização da pesquisa, as informações mais relevantes foram selecionadas e separadas de acordo com cada método de purificação. Além disso, foram procuradas informações com as vantagens e desvantagens de cada método citado.

4.3 Definição do Melhor Método de Purificação

Depois que os dados foram obtidos, foi necessário a criação de uma matriz de tomada de decisão levando em conta os critérios de custo de implementação, tempo de implementação, complexidade de implementação e eficiência de purificação e utilizado a Equação 1 para definição do melhor método:

$$\text{Método} = Ep - ci - cpi - ti \quad (1)$$

Onde:

- Ep: Eficiência de implementação;
- ci: Custos de implementação;
- cpi: Complexidade de implementação;
- ti: Tempo de implementação;

O método com maior pontuação foi classificado como o melhor método a ser utilizado para a purificação do biogás e para cada critério foi definido uma faixa de pontuação de acordo com a análise das informações obtidas para cada método, sendo que:

- Eficiência de implementação: 0 a 50;
- Custos de implementação: 0 a 30;
- Complexidade de implementação: 0 a 20;
- Tempo de implementação: 0 a 10.

Os pesos para cada critério foram dados de acordo com a relevância para a escolha do melhor método, sendo que os mais importantes são a eficiência e o custo, justamente para apresentar o método com melhor custo-benefício. A pontuação para cada método foi definida pelo autor através da análise qualitativa das informações da literatura.

4.4 Implementação e testes do método de purificação

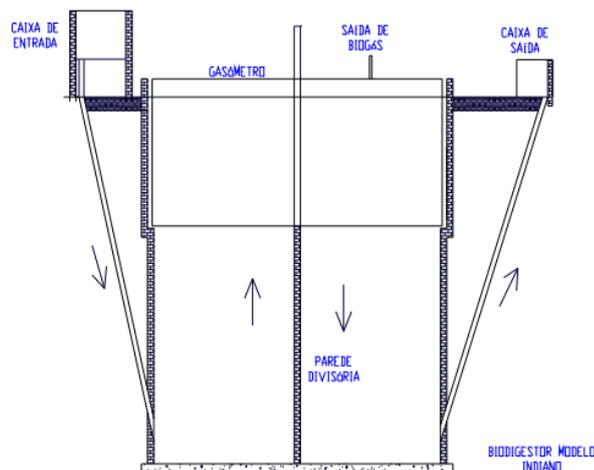
Para implementar o método de purificação selecionado, foi necessário a captação de biogás produzido através de um biodigestor como descrito a seguir:

Biodigestor

O biodigestor utilizado para a captação do biogás, está localizado na Estação de Produção e Uso de Biogás, do Setor de Máquinas e Mecanização, do Departamento de Engenharia, da Universidade Federal de Lavras.

O modelo do biodigestor foi o indiano contínuo de dois compartimentos, com volume útil de 7 m³, construído em fibra de vidro com uma campânula de chapa de aço-carbono servindo com gasômetro, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Esquema do biodigestor utilizado para obtenção de biogás.



Fonte: Do autor (2023).

Matéria Prima e Métodos De Carga:

Como substrato, foram utilizados dejetos frescos de cavalos, coletados no Centro de Equoterapia, no município de Lavras, Minas Gerais. O Centro de Equoterapia é um local de fisioterapia que conta com a participação de cavalos prestando auxílio para crianças e adultos com deficiência ou com necessidades especiais físicas ou psíquicas, oferecido pela Universidade Federal de Lavras. Ele fica na região do Câmpus Histórico da Universidade Federal de Lavras, à esquerda da Portaria Principal, abaixo do nível da pista, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Local da matéria prima utilizada.



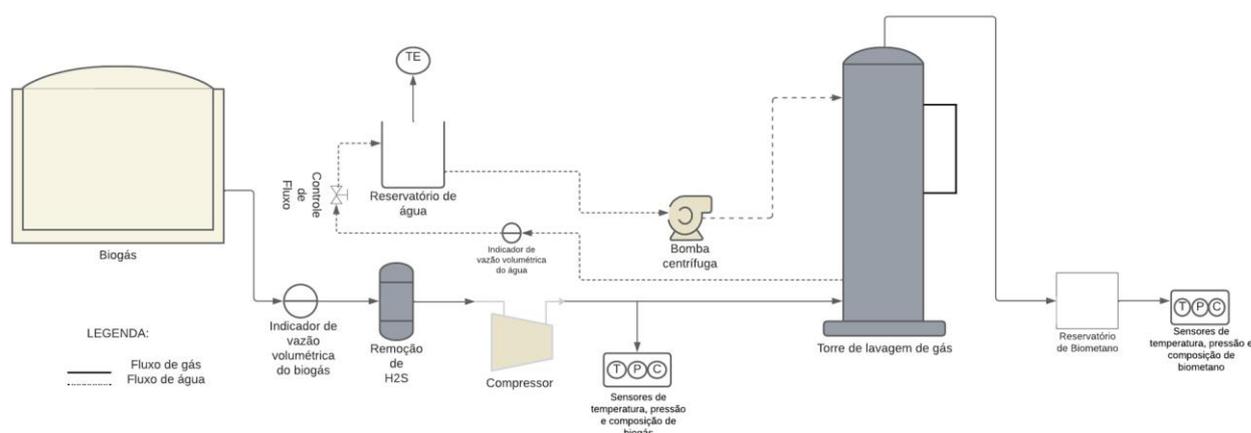
Fonte: UFLA (2023)

As cargas de substrato do biodigestor eram constituídas de 50 litros de esterco fresco de cavalo, que continham alguns resíduos de areia e terra devido ao local onde era armazenado, diluído em 50 litros de água. As cargas ocorriam 2 vezes por semana, totalizando em 200 litros da mistura adicionados ao biodigestor semanalmente durante 6 meses até o dia de realização dos testes.

Esquema estrutural do método de purificação

O método de purificação de biogás com melhor custo-benefício selecionado foi a absorção física utilizando a lavagem com água, como será demonstrado mais adiante. Dessa maneira, após sair do biodigestor, o biogás passou por um pré-tratamento para remoção do excesso de H_2S que constituiu em filtro com limalhas de aço e para a implementação do método de lavagem com água foi utilizado uma torre de lavagem de gases localizada na Estação de Produção e Uso de Biogás. A torre é constituída por um material de preenchimento em seu interior a fim de aumentar a área de contato entre água e gás e suas dimensões são de 4m de altura e 30cm de diâmetro. Após remoção de H_2S , o biogás passou por um compressor e entrou na torre de lavagem de gás pela parte inferior, enquanto a água era adicionada no topo, conforme Figura 11.

Figura 11– Esquema estrutural de purificação de biogás.



Fonte: Do autor (2023).

Depois da ocorrência do contato entre gás e água, o biometano saiu pela parte superior da torre, enquanto a água contaminada saía pela parte inferior, passando pelo sensor de vazão volumétrica de água, pela válvula reguladora de pressão e caindo novamente no reservatório de água. Conforme necessidade, a bomba de água captava a água novamente e bombeava para o topo da torre, reiniciando o ciclo de purificação.

Instrumentação e materiais utilizados:

Para identificar quais variáveis influenciam na eficiência de purificação do biogás, foi necessário realizar a instrumentação do sistema para aferição de temperatura, pressão, vazão do biogás e água e a composição inicial e final do gás conforme esquema da Figura 11.

Dentre as variáveis medidas no processo, estão:

- Temperatura (T_1), pressão (P_1) e composição volumétrica do biogás após ser comprimido e antes de entrar na torre de lavagem de gases;
- Vazão volumétrica (V_a) da água que sai torre de lavagem;
- Temperatura (T_2), pressão (P_2) e composição volumétrica do biogás após ser comprimido e depois de sair da torre de lavagem de gases;

Os sensores utilizados para instrumentação do processo estão descritos na tabela 1:

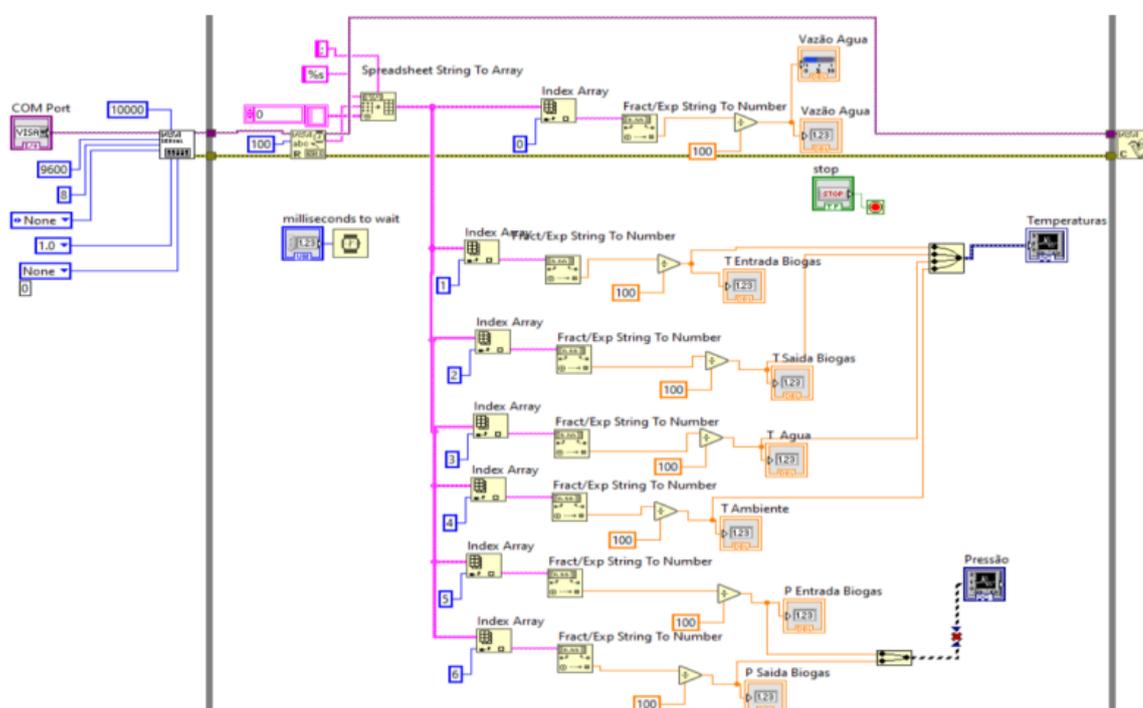
Tabela 1 – Instrumentos utilizados no processo.

Tipo de Sensor	Modelo do Sensor	Unidade	Faixa de Medida	Incerteza
Pressão	YD6080	psi	5-300psi	$\pm 1.0\%FS$
Temperatura	DS18B20	$^{\circ}C$	$-55^{\circ}C$ a $+125^{\circ}C$	$\pm 0.5^{\circ}C$
Vazão de gás	LAO – G-8	m^3/h	$0,06 – 10 m^3/h$	N/A
Vazão de água	YF-B5	L/min	$1 – 30 L/min$	$\pm 3\%$

Fonte: Do autor (2023).

Para que fosse possível a implementação do sistema de aferição das variáveis, foi necessário a criação de uma IHM (interface homem-máquina), a fim de permitir a visualização dos parâmetros de forma limpa e detalhada. Para a criação desta interface, foi utilizado o software o LabVIEW®, que oferece uma abordagem visual didática para programação, onde o usuário cria diagramas de blocos que representam o fluxo do programa. Dessa forma, foi criado um código via diagrama de blocos no LabVIEW® conforme a Figura 12:

Figura 12 – Diagrama de Blocos LabVIEW®.



Fonte: Do autor (2023).

Além dos instrumentos, foram utilizados três componentes que auxiliaram no processo de purificação de biogás: o compressor de gás, bomba d'água e o analisador de composição de gás.

O compressor de gás utilizado foi um compressor de gás elétrico, FERRARI, modelo Mega Air CFC 5,5/6L – 1HP 6L 1hp 220V, conforme Figura 13:

Figura 13 – Compressor de gás.



Fonte: MERCADO LIVRE (2023).

A bomba d'água utilizada foi uma bomba periférica de superfície, da marca FERRARI, com potência de $\frac{1}{2}$ cv, vazão de 1700 L/h e 22 mca. A Figura 14, ilustra o modelo utilizado:

Figura 14 – Bomba d'água utilizada.



Fonte: Amazon (2023).

O analisador de gases utilizado foi um Gasboard – 3200 Plus, que possui sensores que medem CH_4 , CO_2 , O_2 e H_2S . A Figura 15 ilustra o modelo do analisador:

Figura 15 – Analisador de gás.



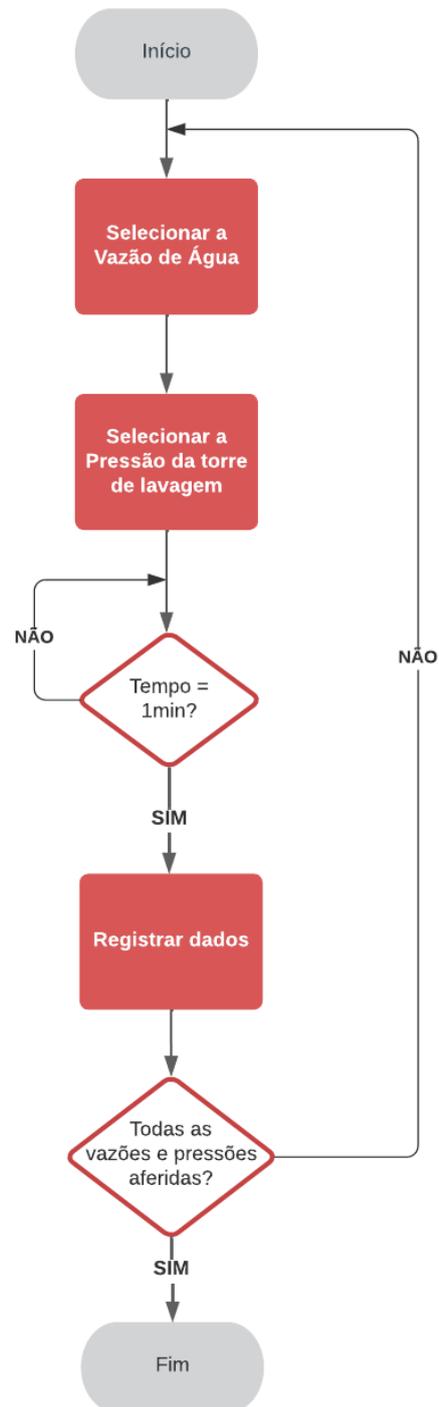
Fonte: Hubei Cubic (2023).

Testes

A fim de verificar a eficiência de purificação do biogás, foi realizado testes na coluna de absorção durante o processo de purificação do biogás. Os testes consistiram na apuração de dados da concentração de gás para 2 vazões de água diferentes, 10 L/min e 15 L/min com a variação de três pressões: $0,7\pm 0,1$; $1,1\pm 0,1$; $1,5\pm 0,1$ bar.

Para realizar os testes, primeiramente foi ajustada a vazão de água em 10 L/min na válvula de controle de fluxo localizada na saída inferior da torre de lavagem de gás, posteriormente, foi medido a porcentagem de composição do biometano na saída superior da torre de lavagem, para cada uma das três pressões. O tempo de estabilização entre as pressões foi de 1 minuto. O mesmo foi realizado para a vazão de 15L/min. Na entrada foi medido apenas 1 vez, visto que a concentração não foi alterada. A condução do processo pode ser visualizada na Figura 16:

Figura 16 – Diagrama do Processo.



Fonte: Do autor (2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito na metodologia, após a realização da pesquisa qualitativa, foi analisado e selecionado as informações de cada medo e compilado na Tabela 2.

Tabela 2: Resumo das informações obtidas sobre os métodos de purificação.

Método	Lavagem com água	Lavagem com solventes	Separação por membrana	Separação Criogênica	Adsorção
Tecnologia	Absorção física	Absorção química	Permeação	Compressão	Adsorção
Pré tratamento	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Pós tratamento	Não	Sim	Não	Não	Não
Absorvente/ Adsorvente	Água	Aminas e solução alcalinas	Películas da membrana	-	Zeolite, sílica, Fe ²⁺
Pressão (bar)	6-10	1-7	20-36	40	4-8
Purificação de metano (%)	Maior que 97%	Entre 96 e 99%	Entre 90% e 99%	Maior que 99%	Maior que 95%
Vantagens	Baixo custo, simples implementação e baixa perda de metano	Baixo custo, simples implementação, baixa perda de metano	Simple implementação	Alta purificação	Não utiliza solvente
Desvantagens	Manutenção periódica	Manutenção periódica e cuidados com o manuseio de produtos químicos	Alto custo, alto consumo de energia e durabilidade instável a longo prazo	Alto custo, alto consumo de energia e tratamento complexo	Alto custo, utiliza muitos equipamentos e manutenção periódica

Fonte: SHAH et al, 2020, adaptado (2023).

Observa-se na Tabela 2, que todos os métodos de purificação de biogás estudados são capazes de tornar o biogás um combustível para ser utilizado como uma energia renovável, uma vez que retiram quase totalmente o CO₂ de sua composição, diminuindo a emissão de gases poluentes e aumentando seu poder calorífico devido à alta quantidade de metano. Apesar disso, cada método de purificação possui suas características próprias que devem ser levadas em consideração para escolha de implementação de acordo com a aplicação desejada.

Enquanto o método de separação criogênica tenha alta eficiência de purificação, ele possui alto custo de implementação e complexidade em sua montagem. Já o método de separação por membrana, possui alta eficiência, simples implementação e manuseio, mas necessita de um estudo aprofundado sobre a membrana mais adequada e possui um alto custo com energia para o seu funcionamento. O método de adsorção também se mostra muito eficiente, uma vez que proporciona alta quantidade de metano, baixo custo e simples implementação. Dentro do método de absorção podemos destacar a absorção física com lavagem com água, que se mostra um método eficiente, com alto teor de metano, com baixo custo, simples implementação e baixo tempo de implementação, visto que é um sistema mecânico compacto e o método de lavagem com solventes, que também é um método que proporciona alta pureza de metano, possui baixo custo e tempo de implementação, mas necessita de um cuidado maior com a escolha e manuseio dos absorventes, visto que cada tipo de adsorvente irá se ligar quimicamente com as impurezas a serem retiradas.

A partir da análise das informações de vantagens e desvantagens de cada método e suas particularidades, foi dada a pontuação para os fatores de eficiência, custo, complexidade e tempo de implementação baseado na escolha empírica do autor, montado a matriz de tomada de decisão e aplicado a Equação 1 para determinação do melhor método conforme Tabela 3:

Tabela 3: Pontuação para matriz de tomada de decisão.

Método de Purificação	Eficiência	Custo	Complexidade	Tempo	Resultado
Separação por membrana	45	25	18	8	-6
Separação criogênica	48	25	15	7	1
Adsorção	40	15	10	5	10
Absorção química	45	10	10	6	19
Absorção física por lavagem com água	45	10	8	5	22

Fonte: Do autor (2023).

Observa-se na coluna de resultados da Tabela 3 que após aplicação da Equação 1, o método de purificação com maior pontuação foi a absorção física por lavagem com água. Um método simples, barato e eficiente como vimos anteriormente. Dessa forma, esse método é classificado com o melhor custo-benefício considerando as variáveis analisadas e os dados e informações da literatura.

Após a seleção do método com melhor custo-benefício, foi realizado a sua implementação conforme descrito na metodologia. Primeiramente foram realizados os testes com a vazão de 10L/min e devido a potência da bomba d'água ser baixa, não foi possível exceder a pressão de 1,6 bar, pois a força gerada pela pressão do gás era superior à que a bomba conseguia exercer, fazendo que o sistema fosse despressurizado. Por este motivo, o primeiro teste foi feito com três variações de pressão, 0,61 bar, 1,11 bar e 1,51 bar. A cada mudança de pressão foi necessário esperar 1 minuto para o que o sistema estabilizasse para que medida da concentração de biometano na saída da torre fosse feita e os resultados das concentrações obtidos estão na Tabela 4:

Tabela 4 – Concentrações de componentes do gás antes e depois da purificação para a vazão de 10 L/min.

Componente	Entrada	0,61 bar	1,11 bar	1,51 bar
CH ₄	40,15%	44,02%	46,60%	48,35%
CO ₂	29,12%	15,24%	14,73%	16,72%
O ₂	8,29%	9,71%	9,41%	8,47%
H ₂ S	8[ppm]	0[ppm]	0[ppm]	0[ppm]

Fonte: Do autor (2023).

Ao observar as concentrações dos componentes do biogás na entrada do sistema, observamos que a quantidade de metano ficou abaixo daquelas apontadas pela literatura, que são de 50-75% de CH₄, 25-50% de CO₂, 0-10% de N₂, 0-3% de H₂S, 0-1% de H₂ e vestígios de outros gases segundo NOORAIN et al., 2018. Essa baixa concentração inicial de metano pode ser explicada devido às baixas temperaturas registradas no local devido à estação de inverno, conforme Tabela 5, dificultando a ação anaeróbica das bactérias.

Tabela 5 – Temperaturas durante os testes com vazão de 10 L/min.

Temperatura	0,61 bar	1,11 bar	1,51 bar
T_1 (°C)	18	15,56	15,62
T_2 (°C)	15,5	15	14,68
T_{amb} (°C)	14,25	13,81	13,81
T_{H_2O} (°C)	18,5	18,43	18,37

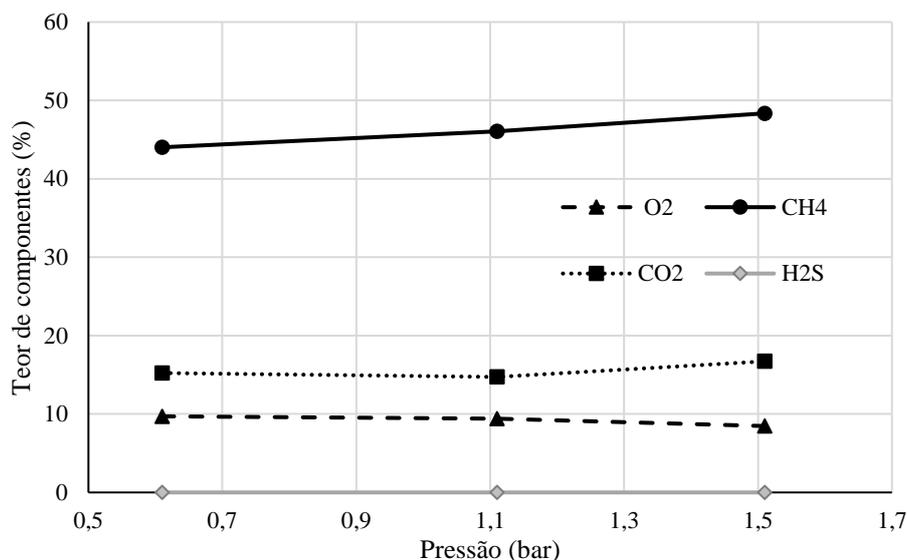
Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar as temperaturas, podemos observar baixa variação levando em consideração os três pontos de pressão, não apresentando grande influência para a

interferência na eficiência de purificação dos testes.

A partir da Tabela 4, correspondente às concentrações dos componentes do biogás após passar pela purificação (biometano), foi construído o Gráfico 1 para melhor visualização dos dados:

Gráfico 1 – Teor dos componentes versus a pressão para a vazão de 10 L/min.



Fonte: Do autor (2023).

Através de uma análise dos resultados dos testes da Tabela 4, é possível observar que o processo de purificação foi condizente com o demonstrado pela revisão de literatura em COZMA et al., 2015, ou seja, conseguiu aumentar a quantidade de metano no biogás, em 19% e diminuir a quantidade de gás carbônico em 75% com a pressão de 1,51 bar. Apesar do método de purificação conseguir cumprir com seu objetivo teórico, a quantidade de metano e gás carbônico finais não foram suficientes para transformá-lo em biometano, que precisa de 97% de metano e 1 a 3 % de gás carbônico para ser utilizado como energia renovável, como visto em MUNOZ et al., 2015. Para aumentar essa porcentagem de metano, uma alternativa seria utilizar uma torre de lavagem com água de alta pressão, que pode ser realizada para absorver ambos CO₂ e H₂S para obter 95–97% de CH₄, como visto em KHAN et al., 2017.

Observando agora o H₂S, foi constatado que o pré-tratamento com o filtro de limalhas de aço foi eficiente, removendo 100% do componente presente no biogás, saindo de 8 ppm para 0 ppm em todas as pressões e livrando-o desse componente

prejudicial.

Como podemos observar no Gráfico 1, quando a pressão aumentou, a concentração de metano também aumentou, nos mostrando que essa variável está diretamente relacionada à eficiência de purificação do biogás.

No Gráfico 1 pode-se observar uma queda seguida de um aumento na quantidade de CO₂, ocasionada, possivelmente, pela saturação de água de purificação.

De forma semelhante, o teste 2 foi realizado com uma vazão de 15 L/min. Após a realização do primeiro teste, o sistema ainda estava pressurizado e, dessa forma o teste 2 iniciou com a pressão máxima, a fim de evitar o desperdício de biometano. Assim, o primeiro ponto a ser coletado foi para a pressão de 1,44 bar, em seguida 1,14 bar e por fim 0,78 bar. Nota-se que os valores de pressão se diferem entre os testes, uma vez que, por mais que o compressor consiga ter um gerenciamento restrito do parâmetro, quando acontece alguma alteração na vazão da água a pressão interna da torre também é influenciada, tornando-a de difícil regulação. Os dados obtidos estão presentes na Tabela 6:

Tabela 6 – Concentrações de componentes do gás antes e depois da purificação para a vazão de 15 L/min.

Componente	Entrada	0,78 bar	1,14 bar	1,44 bar
CH ₄	40,15%	47,71%	47,84%	48,37%
CO ₂	29,12%	20,31%	19,72%	18,45%
O ₂	8,29%	8,05%	8,53%	8,11%
H ₂ S	8[ppm]	0[ppm]	0[ppm]	0[ppm]

Fonte: Do autor (2023).

Uma vez que os testes foram realizados no mesmo período do dia, as concentrações dos componentes do biogás na entrada do sistema para o teste 2 também ficara abaixo daquelas apontadas pela literatura. Como dito anteriormente, essa baixa concentração inicial de metano pode ser explicada devido às baixas temperaturas registradas no local, conforme indicado na Tabela 7, dificultando a ação anaeróbica das bactérias.

Tabela 7 – Temperaturas durante os testes com vazão de 15 L/min (continua).

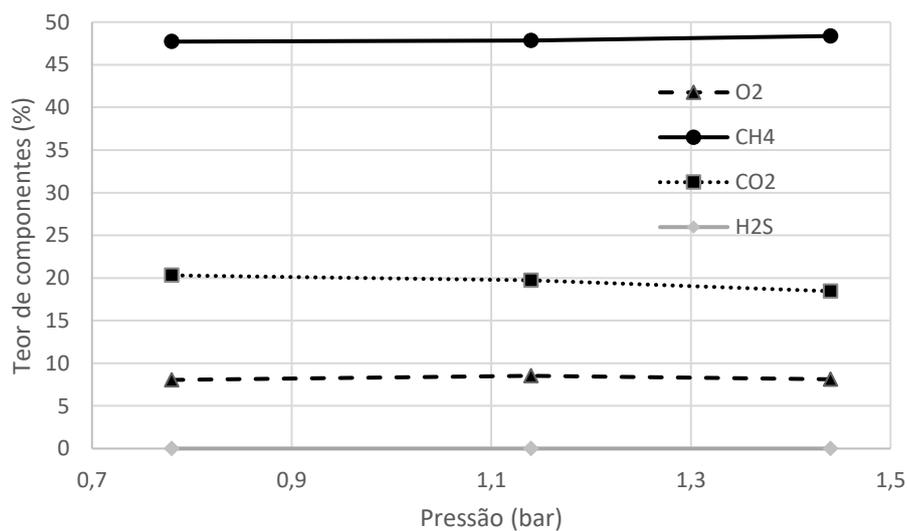
Temperatura	0,78 bar	1,14 bar	1,44 bar
T_{1_2} (°C)	17,56	18,25	19,06
T_{2_2} (°C)	15,12	15,43	15,31
T_{amb_2} (°C)	13,43	13,87	14,06
T_{H2O_2} (°C)	18,5	18,5	18,5

Fonte: Do autor (2023).

Da mesma forma que o teste 1, no teste 2 também houve baixa variação das temperaturas nos três pontos de pressão, não apresentando grande influência para a interferência na eficiência de purificação dos testes.

A partir da Tabela 4, foi possível plotar o Gráfico 2 para as concentrações dos componentes de biometano utilizando a vazão de 15 L/min, como representado abaixo:

Gráfico 2 – Teor dos componentes versus a pressão para a vazão de 15 L/min.



Fonte: Do autor (2023).

Ao observarmos o Gráfico 2, constatamos que a quantidade de metano aumentou em 20% para a maior pressão de 1,41 bar em relação à quantidade de entrada, uma taxa maior se comparado à vazão de 10 L/min. Já o gás carbônico diminuiu em 49% para a maior vazão de 1,41 bar, uma taxa menor se comparado à vazão de 10 L/min, provando, mais uma vez, que a eficiência de purificação é maior em altas pressões.

A variação da vazão também influenciou na diminuição de CO₂ no biogás. Uma vez que a reação entre biogás e água retira o CO₂ para transformação em biometano, o controle da quantidade entre biogás e água se torna interessante para que não ocorra a saturação da água e a eficiência da purificação seja satisfatória.

Para ambas as vazões, a quantidade de H₂S permaneceu zerada, uma vez que o componente foi totalmente retirado na passagem pelo filtro com limalhas de aço.

Ao analisar os dados da Tabela 4, é possível observar que os resultados não apresentaram a mesma eficiência dos obtidos pelo teste 1, uma vez que houve pequenas variações. A causa deste efeito pode ser atribuída ao fato de que o teste 2 foi realizado despressurizando a torre, o que pode não ter a mesma parcela de influência na absorção do CO₂. Outro ponto importante a ser observado nos resultados é a confirmação da influência da pressão no processo, em que segundo a literatura, a solubilidade do CO₂ na água, é influenciada pela pressão e temperatura (GREEN; PERRY, 2008). Que pode ser explicada pelo princípio da lei de Henry, onde ressalta que em altas pressões, mais moléculas de CO₂ podem ser dissolvidas em uma maior quantidade em um mesmo volume de água, quando comparada com uma pressão menor (SMITH et al., 1949).

Observando as Tabelas 3 e 4 e os Gráficos 1 e 2, pode-se verificar que a pressão influencia diretamente na eficiência de purificação, visto que a quantidade de metano foi maior utilizando as maiores pressões em ambos os testes. Embora a metodologia de testes tenha sido satisfatória, a porcentagem de metano e gás carbônico no biogás de saída não foram suficientes para transformá-lo em biometano em ambos os testes, que segundo a literatura corresponde a 95-97% de metano e 1-3% de gás carbônico segundo MUNOZ et al., 2015, isso pode ser explicado devido à baixa pressão alcançada pela bomba d'água, sendo uma solução para tal a utilização de uma bomba com maior potência.

Além disso, avaliando a variação das vazões, segundo Wantz et al., 2022, a cinética de transferência de massa é mais rápida para uma maior vazão do líquido, existindo um equilíbrio entre vazão de água e gás que precisa ser estabelecido para que

ocorra mais eficiência de purificação. Os resultados obtidos mostram que um excesso na vazão do líquido nem sempre é propícia para o desempenho de operação ideais, pois aumenta o consumo de energia sem ganho de pureza no gás.

6 CONCLUSÃO

O biogás é uma fonte de energia renovável muito importante para a sustentabilidade do planeta, entretanto, para sua utilização é necessário realizar a purificação para eliminação de CO_2 e H_2S , que são gases poluentes e causam danos ao meio ambiente. Visto isso, através desse trabalho foi realizado um estudo sobre os métodos de purificação existentes para o biogás, além disso, uma análise sobre as tecnologias de purificação também foi realizada e constatada que os métodos de absorção, adsorção, separação por membrana e separação criogênica são eficazes para a obtenção de grande quantidade de método, mas que cada um tem as suas particularidades e vantagens e desvantagens.

Apesar de todos os métodos serem eficientes na remoção de CO_2 , cada um possui fatores a serem levados em consideração no momento de implementação. Dentre as tecnologias estudadas, a de lavagem com água se mostrou a com melhor custo-benefício, levando em conta sua eficiência de remoção simultânea de CO_2 e H_2S , sua simplicidade e baixo custo de implementação e o tempo para aplicação e purificação baixo.

A escolha do método com melhor custo-benefício apresentada neste trabalho foi uma média de fatores determinados pelo autor e pode variar de acordo com a aplicação desejada. Assim, é necessário maiores estudos de parâmetros para comparação para entender qual é o melhor método de purificação de biogás para cada aplicação, visto que cada processo depende de muitas variáveis diferentes.

Após determinação do método com melhor custo-benefício, foi realizado a implementação do método de lavagem com água, obtendo um resultado satisfatório no aumento da quantidade de metano no biogás, entretanto, abaixo do esperado para ser utilizado como biometano. Além disso, foi realizado testes de algumas variáveis que podem influenciar a eficiência do processo de purificação de biogás e constatado que em maiores pressões a quantidade de metano se eleva. Além disso, a variação da vazão de água apresentou leve influência na quantidade de gás carbônico final, se tornando uma variável a ser analisada no processo.

O método de purificação do biogás utilizando lavagem com água é um método eficiente e indicado para aplicações que requerem baixo custo de implementação e alta eficiência de purificação. Para um aumento na porcentagem final de metano, a pressão

da torre de lavagem deve ser alta e a vazão de água deve ser controlada, a fim de não gerar saturação de CO₂ e dificultar a sua remoção.

7 TRABALHOS FUTUROS

Apesar do resultado de purificação do biogás não ter sido satisfatório para a sua transformação em biometano, podemos tirar algumas soluções dos problemas encontrados para ser aplicado em trabalhos futuros.

Como a válvula de vazão de água ficou na saída da torre de lavagem, não foi possível um controle exato da vazão de água que entrava na torre, dessa forma, o ideal seria alterar a sua posição para a entrada de água da torre de lavagem.

Outro problema constatado, foi com a pressão da bomba d'água, como a potência dela era muito menor que a do compressor, ela não tinha força para bombear a água em altas pressões do gás, sendo a solução para tal, realizar a troca por uma bomba com maior potência. Além disso, a realização de testes com o nível de água da torre constante poderia trazer mais acurácia na relação da vazão de água com a eficiência de purificação do biogás.

Quando falamos da eficiência de purificação do biogás através de lavagem com água, encontramos grandes benefícios no custo, entretanto, a quantidade de metano presente no biogás não foi satisfatória, sendo uma alternativa a adição de uma substância que tenha mais afinidade com o CO₂.

Um ponto importante a ser implementado futuramente é o controle do Ph da água, uma vez que ele é proporcional à quantidade de CO₂ presente, sendo uma forma de determinar a quantidade de CO₂ da água.

REFERÊNCIAS

ABDEEN, F. R. H. et al. A review of chemical absorption of carbon dioxide for biogas upgrading. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 6, p. 693–702, 2016.

ADNAN, A. I. et al. Technologies for biogas upgrading to biomethane: A review. **Bioengineering**, v. 6, n. 4, p. 92, 2019.

AFONSO et al. Confeção e avaliação de um sistema de remoção do CO₂ contido no biogás. **Acta Scientiarum: Technology**, Paraná, v. 26, n 1, p 11-19, 2004.

AMAZON. **Bomba D'água Periférica**. Disponível em:

<<https://www.amazon.com.br/BombaPeriférica-Bivolt-BA-40Ferrari> 1>. Acesso em 11 jul. 2023.

AMIGUN, B.; VON BLOTTNITZ, H. Investigation of scale economies for African biogas installations. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 12, p. 3090-3094, 2007.

ANDRIANI, D. et al. A review on optimization production and upgrading biogas through CO₂ removal using various techniques. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 172, p. 1909-1928, 2014.

ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**. v. 36, p. 452–466, 2018.

ANGHEBEN A. A. **Estudo da remoção de H₂S de biogás sob diferentes condições operacionais utilizando soluções contendo ferro em um sistema em escala de bancada**. 2017. 99 P. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3375>>. Acesso em: 24 mar. 2023.

AUGELLETTI, R.; CONTI, M.; ANNESINI, M. C. Pressure swing adsorption for

biogas upgrading. A new process configuration for the separation of biomethane and carbon dioxide. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1390-1398, 2017.

AWE, O. W. et al. A review of biogas utilization, purification and upgrading technologies. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, p. 267-283, 2017.

BAENA-MORENO, F. M. et al. Membrane-based technologies for biogas upgrading: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, p. 1649-1658, 2020.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Matriz Energética Nacional 2023**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2023/matriz-energetica-nacional-2023>>. Acesso em 2 jun. 2023.

CANEVER, V. B. et al. **Estudo de filtragem de biogás para fins energéticos utilizando como método de filtragem lavador de gases de baixo custo**. 2017.

CARREON, M. et al. Mixed matrix membranes for gas separation applications. In: **Membranes for Gas Separations**. 2018. p. 1-57.

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; PECORA, V. **Biogás- Biocombustíveis ANP**. In: Carlos Augusto G. Perlingeiro. (Org.). **Biocombustíveis no Brasil - Fundamentos, Aplicações e Perspectivas**. C. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014, v. 1, p. 136-167.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. de. Biodigestores. **VI Semana de Tecnologia em Alimentos**, v.02, n.21, 2008.

CERVEIRA, G. S. **Remoção de CO₂ do biogás por permeação em membranas**. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em <<http://hdl.handle.net/11422/7680>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

CHEN, X. Y. et al. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. **RSC**

advances, v. 5, n. 31, p. 24399-24448, 2015.

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro**, 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

COZMA, P. et al. Modeling and simulation of high-pressure water scrubbing technology applied for biogas upgrading. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 17, p. 373-391, 2015.

DEGANUTTI, R. et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **Proceedings of the 4th ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 2002, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn>. Acesso em 3 jun. 2023.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. John Wiley & Sons, 2011.

EZE, J. I.; AGBO, K. E. Maximizing the potentials of biogas through upgrading. **Am. J. Sci. Ind. Res**, v. 1, n. 3, p. 604-609, 2010.

FERREIRA, J. C. B.; SILVA, J. N. Biodigestor: aplicações e potencialidades, um estudo de caso. **II Jornada Científica**, Bambuí, jul. 2009.

FREDDO, A. **Estudo da remoção de dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio de biogás utilizando soluções absorvedoras**. 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2017. Disponível em <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2950>>. Acesso em: 16 fev. 2023.

GOMES, M. G.; DE MORAIS, L. C.; PASQUINI, D. Uso de membranas para purificação de biogás: revisão. **Holos Environment**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 466–501,

2019. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/12339>. Acesso em: 15 jan. 2023.

HAACK, S. C. **Análise técnica e econômica para aproveitamento dos dejetos de caprinos em biodigestores no semiárido baiano em economia**. Tese (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

HEINBERG, R.; FRIDLEY, D. **Our Renewable Future**. 1. ed. Washington: Island Press Washington, DC, 2016.

HICKEL, J.; KALLIS, G. **Is green growth possible?: New Political Economy**. 2019, 25, 469–486. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/13563467.2019.1598964>>. Acesso em 24 jun. 2023.

HUBEI CUBIC. **Analisador para biogas**. Disponível em: < <https://www.directindustry.com/pt/prod/hubei-cubic-ruiyi-instrument-co-ltd/product-187991-2026094.html>> Acesso em 11 jul. 2023.

JIANG, Y. et al. Simultaneous biogas purification and CO₂ capture by vacuum swing adsorption using zeolite NaUSY. **Chemical Engineering Journal**, v. 334, p. 2593-2602, 2018.

JORGE, L. H. de A.; OMENA, E. **Biodigestor**. [S.l.]: SENAI/AM – Escola SENAI “Antônio Simões”, 2012.

KHAN, I. U. et al. Biogas as a renewable energy fuel—A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy conversion and management**, v. 150, p. 277-294, 2017.

KORBAG, I. et al. **Recent advances of biogas production and future perspective**. United Kingdom: IntechOpen, 2020.

KUMAR, M. et al. Biodiesel production from municipal secondary sludge. **Bioresource**

technology, v. 216, p. 165-171, 2016.

MAIA, D. C. S., NIKLEVICZ, R. R., EYNG, E., FRARE, L. M., GIMENES, M. L., e PEREIRA, N. C. ESTUDO DA PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS PARA USO ENERGÉTICO PELA ABSORÇÃO DE H₂S E CO₂. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 1221-1229, 2015.

MERCADO LIVRE. **Compressor de ar elétrico portátil. Disponível em:** <<https://www.mercadolivre.com.br/compressor-de-ar-eletrico-portatil-ferrari-mega-air>>. **Acesso em 11 jul. 2023.**

METZ, B. et al. **IPCC special report on carbon dioxide capture and storage**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

MU, L. et al. 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, p. 135429, 2020.

MUNOZ, R. et al. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, n. 14, p. 727–759, 2015.

NEOENERGIA. **Acordo de Paris: o tratado, as metas e o papel fundamental no combate às ações climáticas**. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/acordo-de-paris.aspx>>. Acesso em 2 jun. 2023.

NOORAIN, R. et al. Biogas purification performance of new water scrubber packed with sponge carriers. **Journal of Cleaner Production**, n. 214, p. 103–111, dez. 2018.

OLAJIRE, A. A. CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications—A review. **Energy**, v. 35, n. 6, p. 2610-2628, 2010.

OLIVER, A. de P. M. **MANUAL DE TREINAMENTO EM BIODIGESTÃO**. [S.l.]: WINROCK INTERNATIONAL BRASIL, 2008.

PETERSSON, A. et al. Biogas upgrading technologies—developments and innovations. **IEA bioenergy**, v. 20, p. 1-19, 2009.

RITCHIE, H.; ROSADO, P; ROSER, M; Fossil Fuels. **Energy**. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/fossil-fuels>>. Acesso em 1 jun. 2023.

ROCHELLE, G. T. Conventional amine scrubbing for CO₂ capture. In: **Absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide**. Woodhead Publishing, 2016. p. 35-67.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1633-1645, 2011.

SAHOTA, S. et al. Review of trends in biogas upgradation technologies and future perspectives. **Bioresource Technology Reports**, v. 1, p. 79-88, 2018.

SCHOLZ, M.; MELIN, T.; WESSLING, M. Transforming biogas into biomethane using membrane technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 17, p. 199-212, 2013.

SHAH, G. et al. Comprehending the contemporary state of art in biogas enrichment and CO₂ capture technologies via swing adsorption. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 9, p. 6588-6612, 2021.

SONGOLZADEH, M. et al. Carbon dioxide separation from flue gases: a technological review emphasizing reduction in greenhouse gas emissions. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014.

SPENCER, D. bp Statistical Review of World Energy, 71st ed.; **BP Plc**: London, UK, 2022. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>. Acesso em: 14 de mai. 2023.

SUN, Q. et al. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 521-532, 2015.

TARRENTO, G. E.; MARTINEZ, J. C. **Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedades rurais, dentro do contexto da produção limpa**. XIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 2006.

THOMMES, M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and applied chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Biblioteca Universitária. **Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses**. 2. ed. Lavras, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. **Ufla na Comunidade**. Disponível em: <<https://www.ufla.br/dcom/2014/05/20/ufla-na-comunidade-projeto-oferece-equoterapia-a-pacientes-de-lavras-e-regiao/>>. Acesso em 10 jul. 2023.

VILARDI, G. et al. Exergy and energy analysis of three biogas upgrading processes. **Energy Conversion and Management**, v. 224, p. 113323, 2020.

WANG, M. et al. Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. **Chemical engineering research and design**, v. 89, n. 9, p. 1609-1624, 2011.

WANTZ, Eliot et al. Rate-based modeling approach for High Pressure Water Scrubbing with unsteady gas flowrate and multicomponent absorption applied to biogas upgrading. **Applied Energy**, v. 312, p. 118754, 2022.

XIAO, Y. et al. CO₂ removal from biogas by water washing system. **Chinese Journal**

of Chemical Engineering, v. 22, n. 8, p. 950-953, 2014.

YOUSEF, A. M. et al. New approach for biogas purification using cryogenic separation and distillation process for CO₂ capture. **Energy**, v. 156, p. 328-351, 2018.