UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

AVALIAÇÃO DA PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS PELOS MÉTODOS DE ADSORÇÃO E FOTOSSINTÉTICO

Joice Mörs

Lajeado/RS, abril de 2024

Joice Mörs

AVALIAÇÃO DA PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS PELOS MÉTODOS DE ADSORÇÃO E FOTOSSINTÉTICO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento, área de concentração Espaço, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa Tecnologia e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. *mont.* Odorico Konrad

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo S. Colares

Lajeado/RS, abril de 2024

Joice Mörs

AVALIAÇÃO DA PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS PELOS MÉTODOS DE ADSORÇÃO E FOTOSSINTÉTICO

A Banca examinadora abaixo aprova a Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Ambiente e Desenvolvimento, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento, na área de concentração Espaço, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa Tecnologia e Ambiente:

Prof. Dr. *mont.* Odorico Konrad - Orientador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Dr. Gustavo Stolzenberg Colares - Coorientador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Dr. Ênio Leandro Machado
Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC

Dr. Claudionor de Oliveira Silva
Secretaria de Estado de Educação/Alagoas - SEDUC

Prof. Dra. Aline Antônia Castro
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES

Lajeado/RS, 23 de abril de 2024

AGRADECIMENTOS

Ao meu companheiro de vida, Sanatiel, pai do nosso filho Miguel, agradeço pelo amor, pela amizade, cumplicidade, por me apoiar e incentivar nesta etapa da minha vida, e pela paciência nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Ivone e Jacó, expresso minha gratidão por sempre me apoiarem e incentivarem a investir nos estudos, por acreditarem que é o caminho certo para realizar meus sonhos. E aos meus irmãos, Joel e Jonas, agradeço por compartilharem a vida comigo e demonstrarem alegria com as minhas conquistas.

Ao meu orientador, Odorico Konrad, manifesto meu reconhecimento por todo o apoio, incentivo, confiança, pelos bons momentos compartilhados durante esta jornada, e por acreditar em mim e me fazer enxergar que é possível chegar muito longe ainda.

Ao meu coorientador, Gustavo S. Colares, agradeço pelo apoio, incentivo, boas ideias trocadas, e pelos bons momentos, assim como a todos os bolsistas com quem tive o prazer de conviver, e à equipe CPETS, que foi parte essencial nesta etapa, sempre pronta para ajudar quando necessário.

Aos demais professores e funcionários do PPGAD e da Univates, aos membros da banca examinadora, e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, expresso minha sincera gratidão.

RESUMO

Os seres humanos necessitam de suprimentos e energia para sobreviver, e para suprir a demanda, a exploração de recursos naturais e o uso de fontes de energia fósseis se faz necessária. As fontes fósseis são finitas e altamente poluentes, apontadas como a principal fonte de emissão de gases do efeito estufa. Em busca da redução destas emissões, acordos internacionais foram assinados por diversos países, um destes acordos é a Agenda 2030, com ações direcionadas para o desenvolvimento sustentável e a gestão adequada dos resíduos. A geração de biogás se destaca como uma importante ferramenta para cumprir as metas dos acordos globais, pois além da geração de energia realiza o tratamento dos resíduos orgânicos durante o processo de digestão anaeróbia. Para possibilitar o uso do biogás como fonte energética, é necessário remover componentes indesejáveis, para o qual diversas técnicas podem ser utilizadas, como os métodos físico-químicos e biológicos. Entre os métodos físico-químicos, o carvão ativado é amplamente utilizado para a remoção do sulfeto de hidrogênio (H_2S), já o método fotossintético se destaca entre os métodos biológicos, pois é capaz de remover simultaneamente H_2S e dióxido de carbono (CO_2) do biogás. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de dessulfurização do biogás através da adsorção, utilizando carvão ativado como meio adsorvente, e desenvolver um protótipo para purificação do biogás pelo método fotossintético, utilizando microalgas da espécie *Chlorella sorokiniana*. Para realização do ensaio de adsorção, um filtro foi preenchido com carvão ativado e três etapas de testes foram realizadas, atingindo, respectivamente, médias de eficiência na remoção do H_2S de 99,54 ± 0,53%, 80,14 ± 26,03% e 79,55 ± 2,19%. O método de purificação com microalgas foi avaliado por meio de um protótipo de purificador em escala de bancada composto por um fotobiorreator e uma coluna de transferência, em um sistema de fluxo contínuo de biogás. A remoção de H_2S e CO_2 foi de 60,8% e 20,2%, respectivamente, nas primeiras 24 horas, aumentando para 83,4% e 29,7% entre 24 e 240 horas. Embora eficientes, ambos os métodos podem alcançar resultados superiores com ajustes no fluxo e no processo. No caso do sistema com microalgas, otimizações como o controle da vazão do biogás e o ajuste do tamanho das bolhas na coluna de transferência são cruciais para maximizar a área de contato entre o biogás e as microalgas, aumentando assim a eficiência do sistema. Além disso, o ajuste do pH também pode ser considerado para potencializar os resultados. No sistema com carvão ativado, ajustes na vazão do biogás também podem vir a melhorar os resultados.

Palavras-chave: Biometano; Carvão Ativado; Dióxido de Carbono (CO_2); Microalgas; Sulfeto de Hidrogênio (H_2S).

ABSTRACT

Human beings need supplies and energy to survive, to supply this demand the exploitation of natural resources and the use of fossil energy sources are necessary. Fossil fuel sources are finite and highly polluting being pointed as the main source of greenhouse gas emissions. In pursuit of reducing these emissions, international treaties have been signed by several countries, including the 2030 Agenda with actions focused on sustainable development and proper waste management. Biogas production stands out as na importante tool for meeting the goals of global agreements as it not only generates energy but also treats organic waste during the anaerobic digestion process. To enable the use of biogas as an energy source, it is necessary to remove undesirable components for which various techniques can be used, such as physico-chemical and biological methods. Among the physico-chemical methods activated carbon is widely used for the removal of hydrogen sulfide (H_2S) while the photosynthetic method stands out among the biological methods as it is capable of simultaneously removing H_2S and carbon dioxide (CO_2) from biogas. On this context the aim of this study was to evaluate the efficiency of biogas desulfurization through adsorption using activated carbon as the adsorbent medium, and to develop a prototype for biogas purification by the photosynthetic method using microalgae of the species *Chlorella sorokiniana*. For the adsorption test, a filter was filled with activated carbon and three test stages were conducted, achieving average efficiencies in H_2S removal of 99.54 ± 0.53%, 80.14 ± 26.03%, and 79.55 ± 2.19%, respectively. The purification method using microalgae was evaluated using a bench-scale prototype purifier consisting of a photobioreactor and a transfer column in a continuous biogas flow system. The removal of H_2S and CO_2 was 60.8% and 20.2%, respectively in the first 24 hours, increasing to 83.4% and 29.7% between 24 and 240 hours. Although efficient, both methods can achieve superior results with adjustments in flow and process. In the case of the system involving microalgae, optimizations such as controlling the biogas flow and adjusting the bubble size in the transfer column are crucial to maximize the contact area between the biogas and the microalgae, thereby increasing system efficiency. Additionally, pH adjustment can also be considered to enhance results. In the activated carbon system, adjustments in biogas flow can also potentially improve outcomes.

Keywords: Biomethane; Activated Carbon; Carbon Dioxide (CO_2); Microalgae; Hydrogen Sulfide (H_2S).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Objetivos do presente estudo…...…….…....….12
Figura 02 - Reator de inox e gasômetro utilizados para produção e armazenamento do biogás…….....…..…14
Figura 03 - Filtro de dessulfurização do biogás com carvão ativado……...……..…15
Figura 04 - Coleta da amostra de biogás para análise……...…….…..……..…16
Figura 05 - Concentrações de CH_4 e CO_2 do biogás bruto e após contato com carvão ativado……...18
Figura 06 - Concentração de H_2S do biogás bruto e após contato com carvão ativado e eficiência de remoção……..…….……..……19
Figura 07 - Inter-relações entre os objetivos específicos desta pesquisa e resultados obtidos.25

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Parâmetros de avaliação e respectivos sensores do equipamento Awiflex……16
Tabela 02 - Composição do biogás bruto durante o período de testes…….…….……17
Tabela 03 - Composição do biogás tratado durante o período de testes……...17

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....8
1.1 Objetivo Geral.....11
1.2 Objetivos Específicos.....11
1.3 Justificativa.....11
1.4 Estrutura da dissertação.....12

2. DESSULFURIZAÇÃO COM CARVÃO ATIVADO.....13
2.1 Metodologia do ensaio com filtro de carvão ativado.....14
2.2 Resultado dos testes com filtro de carvão ativado.....17

3. PURIFICAÇÃO COM MICROALGAS.....22

4. DISCUSSÃO GERAL.....24

5. CONCLUSÃO.....27

REFERÊNCIAS.....28

1 INTRODUÇÃO

O processo da globalização acelerou a disseminação de novas tecnologias, produtos e serviços, intensificando o consumo, a exploração de recursos naturais e a geração de resíduos (Costa; Diz; Oliveira, 2018). Além disso, uma quantidade significativa de energia é necessária para manter o atual padrão de vida da população, que atualmente é suprida, em grande parte, por fontes fósseis, principais responsáveis pelo aquecimento global devido à emissão de gases do efeito estufa (GEE) (Demanboro; Bergamaschi, 2020). As fontes fósseis, além de poluentes, são finitas, dessa forma, o incremento de fontes renováveis de energia na matriz energética global é fundamental para a redução da emissão dos gases de efeito estufa (Khan, *et al.*, 2021; Wang, *et al.*, 2022).

A exploração em excesso dos recursos naturais e a destinação inadequada de resíduos gera impactos significativos, como poluição da água, do solo e atmosfera. Devido a isso, a preocupação com o esgotamento dos recursos e a degradação ambiental têm crescido em todo o mundo. Neste sentido, as conferências e encontros mundiais para debater a crise ambiental e firmar acordos surgiram (Braga *et al*., 2021; Rodrigues, 2019). A partir das conferências surge o termo "desenvolvimento sustentável", definido pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2016) como: "aquele que atende as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades", em busca deste equilíbrio, em 2015 foi apresentada a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. A Agenda 2030 é uma ferramenta internacional que orienta os Países, Estados e Municípios na busca pelo desenvolvimento sustentável, composta por 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, que atuam nas esferas ambiental, social e econômica. Este trabalho tem um foco particular nos ODS 7: Energia Limpa e Acessível,

ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura e ODS 13: Combate às alterações climáticas (United Nations, 2015).

As fontes não renováveis de energia são as principais responsáveis pela emissão de GEE a nível mundial, representando mais de 65% do total de emissões (Moreira *et al*., 2022). Em 2022, foram emitidos no Brasil, 423 milhões de toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente ($CO_{2\text{-eq}}$), no qual os setores de transportes, indústria e as residências foram responsáveis, respectivamente, por 210,4, 76,7 e 18,6 milhões de toneladas de $CO_{2\text{-eq}}$ (EPE, 2023). Portanto, o aumento das fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira, como a energia solar, fotovoltaica, eólica, biogás, entre outras, é essencial para a redução das emissões de GEE, principalmente o Dióxido de Carbono (CO_2).

Entre as fontes de energias renováveis o biogás tem se destacado, pois pode ser utilizado para geração de energia elétrica, calor ou biocombustível e ser produzido a partir de diferentes materiais orgânicos, como os resíduos de alimentos, agrícolas, florestais, industriais, dejetos de animais, microalgas e resíduos industriais, florestais e resíduos sólidos urbanos (Konrad *et al.*, 2016; Zabed *et al.*, 2020). Entre suas vantagens destacam-se a redução da emissão de GEE e destinação ambientalmente adequada de materiais orgânicos. O biogás é gerado a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, processo metabólico que requer condições específicas e ocorre a partir da atividade de diferentes microrganismos atuando em sinergia. Esse processo ocorre em quatro fases interdependentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022; Amin *et al.*, 2021; Nguyen; Khanal, 2018).

A composição do biogás pode variar conforme o material de origem, e sua energia pode ser explorada por diferentes meios, como geração de calor, de eletricidade, liquefação em metanol ou como combustível gasoso, podendo inclusive, ser inserido na rede de gás natural (Konrad *et al.*, 2016; Zabed *et al.*, 2020), porém, devido a presença em excesso de alguns componentes, como o CO_2, o H_2S e o O_2, para possibilitar o uso do biogás em qualquer uma de suas aplicações, normalmente é necessário submetê-lo a algum processo de tratamento.

Diferentes tecnologias para tratamento ou purificação do biogás podem ser aplicadas, e a escolha da técnica mais adequada varia conforme as características finais pretendidas do gás. Ainda, para definir o melhor método, deve-se atentar para a composição do biogás, sua vazão e o principal, sua aplicação final (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022). A remoção dos

compostos considerados contaminantes do biogás, principalmente o CO_2 e o H_2S, melhora a qualidade do gás e atende aos requisitos exigidos pela legislação, possibilitando seu uso e comercialização (Marcucci, 2021). Tais compostos devem ser removidos não somente para atender a legislação, mas também para evitar danos aos materiais ou à saúde humana e para atender as especificações dos equipamentos. Em grande parte, os contaminantes do biogás causam danos severos às instalações ou a saúde humana, e no caso do CO_2, reduz o poder calorífico do gás. Neste sentido, devem ser removidos para viabilizar o uso ou comercialização do gás como biometano ou para outros usos, como em caldeiras, geradores de energia ou turbinas (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022; Marcucci, 2021).

Diversas técnicas de tratamento e purificação do biogás podem ser utilizadas. Os principais métodos são os físico-químicos, como a absorção, adsorção, separação por membranas, *Pressure Swing Adsorption* (PSA), refrigeração e condensação. Os métodos biológicos de purificação do biogás, como a dessulfurização, as microalgas e biofiltros, são alternativas promissoras para remoção do CO_2 e H_2S (Becker *et al.*, 2022, Castro *et al*., 2022; Miyawaki *et al*., 2021; Angelidaki *et al*., 2019). Os métodos biológicos de purificação do biogás vêm se desenvolvendo e atraindo mais atenção, pois comparados aos métodos tradicionais (físico-químicos), os benefícios como simplicidade de operação, sustentabilidade dos sistemas e questões econômicas se destacam (Das; Ravishankara; Lens, 2022).

As técnicas de remoção de contaminantes do biogás por adsorção utilizam materiais como zeólitas sintéticas, carvão ativado e óxido de ferro para remover componentes como H_2S, nitrogênio (N_2), amônia (NH_3), água (H_2O) (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022). O carvão ativado é amplamente usado para remoção de H_2S devido ao baixo custo de implantação, porém é considerado eficaz para para concentrações até 3.000 ppm de H_2S, limitando sua aplicação a pequena escala (Kapłan *et al*., 2021; Liu *et al*., 2020; Bak *et al*., 2019).

O método fotossintético de purificação do biogás se baseia no uso de microalgas, e se destaca principalmente pela capacidade de remover simultaneamente CO_2 e H_2S. O CO_2 é removido do biogás através do processo de fotossíntese realizado pelas microalgas, utilizando o carbono como fonte de nutriente. A remoção do H_2S é realizada por meio de bactérias oxidantes de enxofre, que se desenvolvem no meio de cultivo (fotobiorreatores) devido ao oxigênio (O_2) liberado pelas microalgas durante a fotossíntese (Ángeles *et al*., 2020; Del Rosario Rodero *et al.*, 2019). As microalgas dos gêneros *Chlorella, Pseudanabaena* e *Scenedesmus*, e bactérias oxidantes de enxofre do gênero *Thiobacillus* são geralmente

identificados em fotobiorreatores utilizados para purificação do biogás (Angelidaki *et al*., 2019). Neste sentido, este trabalho buscou avaliar dois métodos de purificação do biogás, sendo um método físico-químico, a adsorção por carvão ativado, e o método biológico fotossintético, a partir de microalgas.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente estudo é avaliar a eficiência de dessulfurização do biogás através da adsorção e desenvolver um protótipo para purificação do biogás pelo método fotossintético, utilizando microalgas da espécie *Chlorella sorokiniana.*

1.2 Objetivos Específicos

- Verificar a eficiência da dessulfurização do biogás utilizando carvão ativado como meio adsorvente;
- Desenvolver um protótipo de fotobiorreator e coluna de transferência para cultivo de microalgas;
- Avaliar a eficiência da remoção de CO_2 e H_2S do biogás pelas microalgas da espécie *Chlorella sorokiniana*.

1.3 Justificativa

Investir em energia limpa e acessível e adotar padrões de produção e consumo sustentáveis impulsiona o desenvolvimento econômico e social de forma equitativa, ao mesmo tempo em que preserva os recursos naturais para as gerações futuras. Isso está alinhado com as metas estabelecidas no Acordo de Paris (2015), no Compromisso Global do Metano (*Global Methane Pledge*) (2021) e nos ODS da Agenda 2030 (Curiel-Esparza *et al.*, 2019; Brasil, 2022).

O uso de energias renováveis a partir do biogás, é justificado pelo seu potencial de geração contínua de energia limpa. Além disso, a geração de biogás permite o tratamento de materiais orgânicos e a produção de insumos, como fertilizantes, em um único processo. Empresas têm empregado tecnologias para a produção de biogás visando tratar efluentes, gerar energia e reduzir custos, o que indica um amplo espaço para o desenvolvimento de projetos nesse setor (Milanez *et al*., 2018).

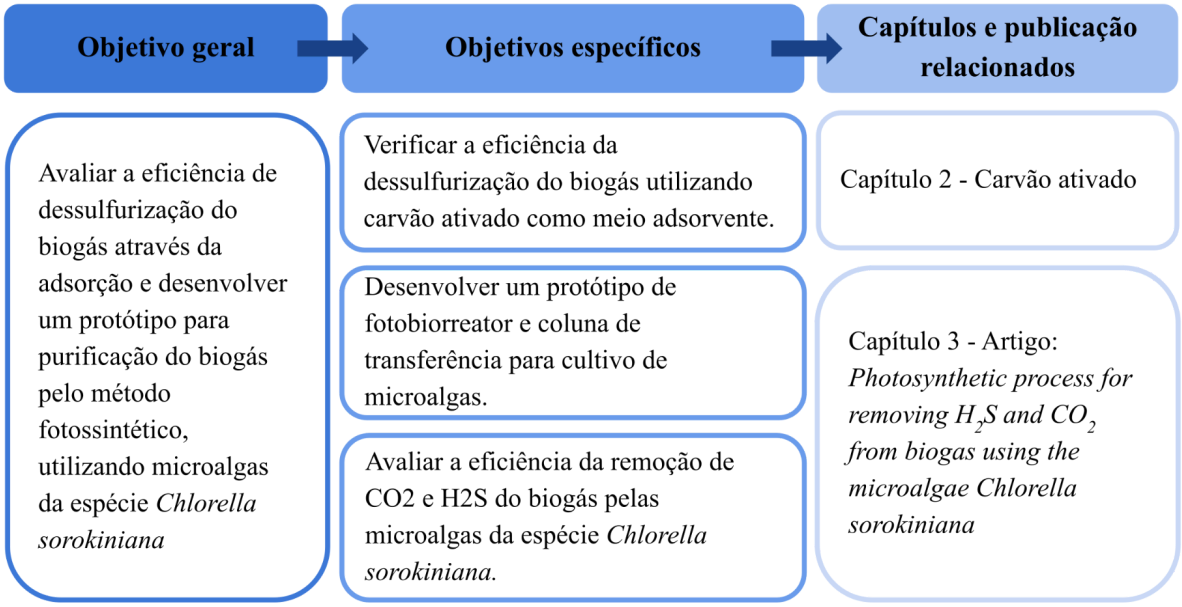
Nesse sentido, o Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento

(PPGAD) da Universidade do Vale do Taquari - Univates concentra suas pesquisas na avaliação da interação entre o homem e o ambiente, abordando as questões ambientais de forma ecocêntrica e interdisciplinar. A linha de pesquisa Tecnologia e Ambiente tem como foco o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias e metodologias ambientalmente compatíveis, incluindo soluções energéticas e tecnológicas. Portanto, o objetivo deste trabalho, investir na criação de tecnologias acessíveis e sustentáveis para a purificação do biogás, está alinhado com os objetivos do PPGAD e dos ODS.

1.4 Estrutura da dissertação

Considerando o regimento do PPGAD, a estrutura dessa dissertação seguirá o disposto no Artigo 32, parágrafo 1º da Resolução 003/Consun/Univates, de 12/01/2021. A Figura 1 apresenta os objetivos específicos do presente estudo, e seus capítulos e publicação relacionados a cada um.

Figura 1 - Objetivos do presente estudo



Fonte: da autora (2024).

Desta forma, o Capítulos 2 aborda o conceito da dessulfurização do biogás utilizando o método de adsorção, a metodologia empregada e os resultados alcançados. O Capítulo 3 traz comentários sobre a publicação citada, no qual apenas o resumo é apresentado nesta dissertação. O Capítulo 4 apresenta uma discussão geral sobre os objetivos e respectivos resultados alcançados, e no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente estudo.

2. DESSULFURIZAÇÃO COM CARVÃO ATIVADO

O primeiro objetivo proposto neste estudo é "verificar a eficiência da dessulfurização do biogás utilizando carvão ativado como meio adsorvente". Esta avaliação foi realizada partindo da necessidade de remoção de H_2S do biogás produzido na Planta Piloto do Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (CPETS) a partir da biodigestão da substratos orgânicos, visto que o H_2S é um componente que confere mau odor, é altamente tóxico e corrosivo (Marcucci, 2021).

As técnicas de remoção de contaminantes do biogás por adsorção podem remover componentes como H_2S, N_2, amônia (NH_3), água (H_2O) dentre outros, e diferentes materiais adsorventes são utilizados, como zeólitas sintéticas, carvão ativado, óxido de ferro, gel de sílica ou alumina (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022). Nesta técnica, um gás alvo é separado dos demais utilizando um material adsorvente específico para o componente que busca-se remover, com grande área superficial e volume de poros (Bak *et al*., 2019).

O carvão ativado é um dos materiais adsorventes mais utilizados e versáteis, pode ser obtido a partir de plantas, resíduos alimentares, resíduos agroindustriais e resíduos industriais. É utilizado para remoção do H_2S no fluxo de gases à temperatura do ambiente, principalmente devido à sua estrutura porosa, têm baixos custos de aplicação, pode ser reciclado e reutilizado, sendo considerado rentável para concentrações de até 3.000 ppm de H_2S (Kapłan *et al*., 2021; Liu *et al*., 2020; Bak *et al*., 2019). Porém, Liu *et al*. (2020) comentam que a seletividade de adsorção e dificuldade de regeneração do carvão ativado pode prejudicar sua aplicação na indústria, assim como Bak *et al*. (2019), que afirmam ser um processo adequado para aplicação em pequena escala. Além disso, a destinação final dos subprodutos do processo podem encarecer a operação (Khan *et al*., 2021).

O carvão ativado possui alta eficiência quando comparado com zeólitas, adsorventes de óxidos comerciais e peneiras iônicas (Kapłan *et al*., 2021), e pode ser impregnado com

permanganato de potássio ($KMnO_4$), iodeto de potássio (KI), carbonato de potássio (K_2CO_3) ou óxido de zinco (ZnO), que agem como catalisadores e tem como objetivo o aumento da velocidade de reação de oxidação do H_2S e aumento da capacidade de adsorção (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

O material adsorvente é instalado na linha do biogás, e normalmente é constituído por um filtro de material inerte à corrosão, como PVC ou aço inox (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022; Kapłan *et al*., 2021). A capacidade de adsorção do carvão ativado não impregnado com uma solução oxidante é cerca de 20 miligramas de H_2S por grama de carvão ativado, já quando impregnado, pode chegar a 150 miligramas de H_2S por grama de carvão ativado, dessa forma, é possível estimar a massa de carvão ativado necessário para determinados períodos (dias ou meses), através da multiplicação da vazão do biogás pela concentração de H_2S (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

2.1 Metodologia do ensaio com filtro de carvão ativado

Os testes foram realizados no CPETS, localizado no Parque Científico e Tecnológico do Vale do Taquari (Tecnovates) da Universidade do Vale do Taquari - Univates. O filtro preenchido com carvão ativado para dessulfurização do biogás foi instalado na Planta Piloto do CPETS (Prédio 26). O biogás utilizado nos testes foi produzido a partir da digestão anaeróbia de substratos orgânicos, gerado em um reator de inox com capacidade de 2 m³, preenchido com cerca de 1 m³ de biomassa, mantido em temperatura mesofílica (35 ºC). O reator foi alimentado diariamente. O biogás gerado foi armazenado em gasômetro de 20 m³, produzido com laminado reforçado constituído por tecido de fios de poliéster e revestidos com PVC em ambas as faces (Figura 02).

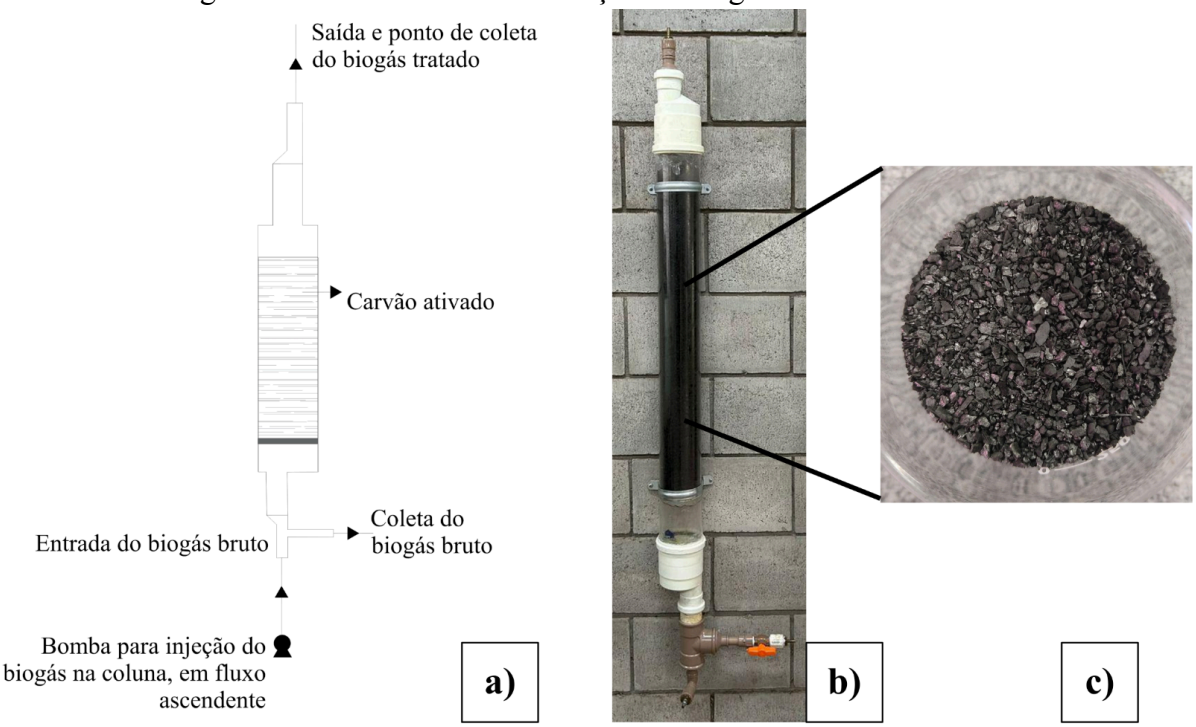
Figura 02 - Reator de inox e gasômetro utilizados para produção e armazenamento do biogás

Fonte: da autora (2024). Legenda: a) reator de aço inox; b) gasômetro.

Três ensaios foram realizados entre 25 de julho de 2023 e 21 de agosto de 2023. O biogás foi injetado no filtro preenchido com carvão ativado (Figura 4 c) utilizando uma bomba modelo MiniBomba D'água RS-385, e a vazão monitorada com medidor de vazão tipo tambor da marca Ritter, modelo TG 0.5, que registra 0,5 L a cada volta do relógio.

O filtro foi confeccionado em acrílico, com 0,1 m de diâmetro externo, espessura de 2 mm e altura de 1 m, com volume total de 0,007 m³ e conexões em PVC. Preenchido com 0,72 m de carvão ativado granulado, totalizando 0,005 m³ e 2.084,07 g. O ponto de entrada do biogás e de coleta para análise da amostra bruta estão dispostos na parte inferior da coluna, e na superior o ponto de saída e coleta da amostra tratada (Figura 03).

Figura 03 - Filtro de dessulfurização do biogás com carvão ativado



Fonte: da autora (2024). Legenda: a) desenho esquemático do filtro de dessulfurização; b) filtro de dessulfurização montado; c) carvão ativado granulado

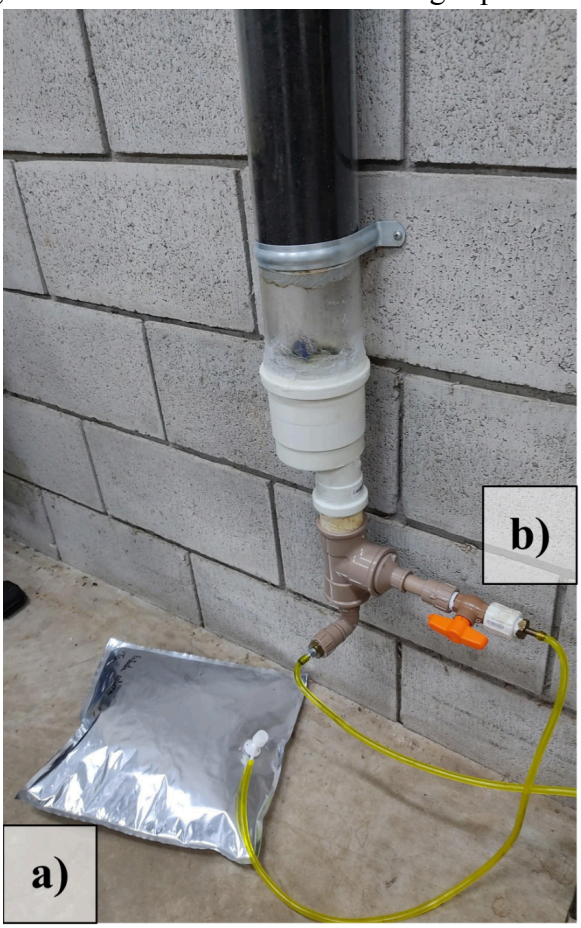
A eficiência da dessulfurização foi avaliada a partir da análise da composição do biogás bruto e tratado, com análises diárias da entrada e saída do filtro, compreendendo os seguintes componentes: CH_4, CO_2, O_2, H_2 e H_2S. A leitura foi feita com o analisador de gases Awiflex, da marca Awite, conforme princípios apresentados na Tabela 01. A coleta das amostras para análise foi realizada com *bag* metalizada, com volume de 5 L, específicas para coleta e armazenamento de biogás, conforme Figura 04.

Tabela 01 - Parâmetros de avaliação e respectivos sensores do equipamento Awiflex

Sensor	Princípio de medição		Faixa de medição	Repetibilidade
Metano (CH_4)	Sensor infravermelho de feixe duplo	Controlado termostaticamente, pressão compensada	0 - 100 Vol.-%	± 0,2%
Dióxido de carbono (CO_2)	Sensor infravermelho de feixe duplo	Controlado termostaticamente, pressão compensada	0 - 100 Vol.-%	± 0,2%
Oxigênio (O_2)	Eletroquímico	Pressão compensada	0 - 25 Vol.-%	± 0,1%
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	Eletroquímico	Pressão compensada	0 - 5.000 ppm	± 1%
Hidrogênio (H_2)	Eletroquímico	Pressão compensada	0 - 2.000 ppm	± 1%

Fonte: Awite (2022).

Figura 04 - Coleta da amostra de biogás para análise



Fonte: da autora (2024). Legenda: a) Bag metalizada de 5L para coleta de gás; b) ponto de coleta do biogás bruto para análise.

2.2 Resultado dos testes com filtro de carvão ativado

Foram realizados três ensaios de dessulfurização do biogás. A primeira ocorreu entre os dias 25 de julho e 03 de agosto de 2023, não ocorreram pausas, totalizando 208 horas. Nesta etapa, foram tratados 26.174 litros de biogás, ou seja, 26,2 m³. A segunda rodada de testes iniciou quando uma quantidade significativa de biogás havia sido produzida e armazenada no gasômetro, foram 9.241 litros, 9,2 m³ de biogás dessulfurizado, durante 72 horas, sem pausas, entre os dias 11 e 14 de agosto de 2023. A última etapa foi realizada nos dias 18 a 21 de agosto de 2023, compreendendo 78 horas ininterruptas, e 8.482 litros de biogás, ou 8,5 m³. A Tabela 02 apresenta a composição média do biogás bruto durante os períodos analisados.

Tabela 02 - Composição do biogás bruto durante o período de testes

Etapa	Composição do biogás bruto				
	CH_4 - %	**O_2 - %**	**CO_2 - %**	**H_2 - ppm**	**H_2S - ppm**
1º (25 - 03/08/2023)	56,49 ± 0,97	0,24 ± 0,30	43,27 ± 1,08	34,13 ± 10,21	1.006,73 ± 259,30
2º (11 - 14/08/2023)	49,32 ± 0,45	0,08 ± 0,07	50,60 ± 0,40	20,90 ± 8,19	4.700,10 ± 384,00
3º (18 - 21/08/2023)	55,49 ± 0,91	0,00 ± 0,00	44,51 ± 0,91	29,35 ± 5,45	4.131,90 ± 192,65

Fonte: da autora (2024).

Na 1º etapa dos testes, o teor de H_2S estava mais baixo que nas etapas 2 e 3. Esta diferença na composição é interessante para avaliar a eficiência de adsorção do carvão ativado e a saturação.

A composição média do biogás tratado, após o contato com o carvão ativado, pode ser visualizada na Tabela 03.

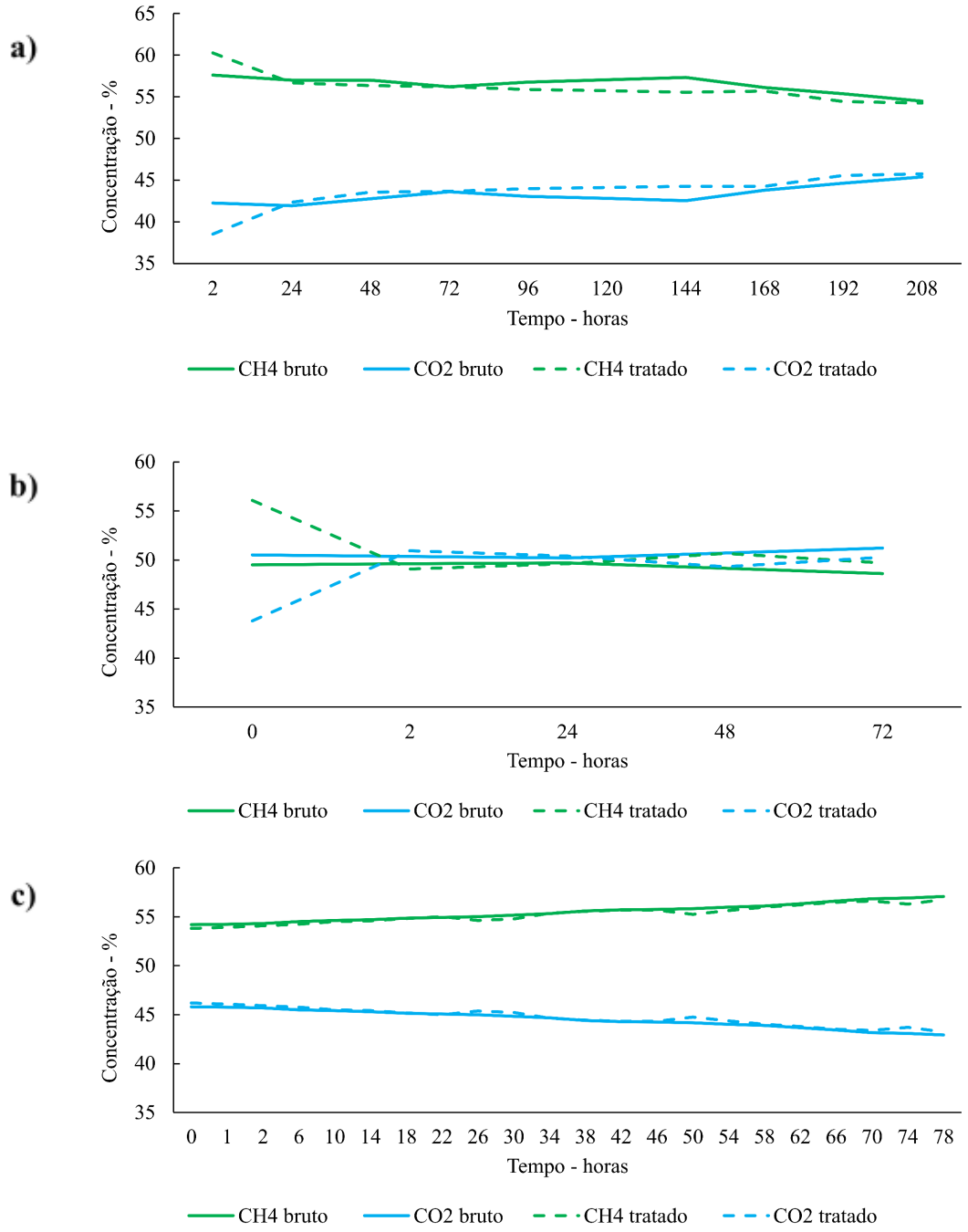
Tabela 03 - Composição do biogás tratado durante o período de testes

Etapa	Composição do biogás tratado				
	CH_4 - %	**O_2 - %**	**CO_2 - %**	**H_2 - ppm**	**H_2S - ppm**
1º (25 - 03/08/2023)	56,10 ± 1,65	0,29 ± 0,44	43,60 ± 2,03	35,20 ± 9,86	3,88 ± 4,34
2º (11 - 14/08/2023)	51,02 ± 2,88	0,04 ± 0,06	48,94 ± 2,94	24,60 ± 12,38	999,80 ± 1.323,94
3º (18 - 21/08/2023)	55,27 ± 0,90	0,00 ± 0,00	44,73 ± 0,90	25,31 ± 8,02	914,70 ± 502,81

Fonte: da autora (2024).

A Figura 05 apresenta os resultados das análises de CH_4 e CO_2 do biogás bruto e tratado (após contato com o carvão ativado).

Figura 05 - Concentrações de CH_4 e CO_2 do biogás bruto e após contato com carvão ativado



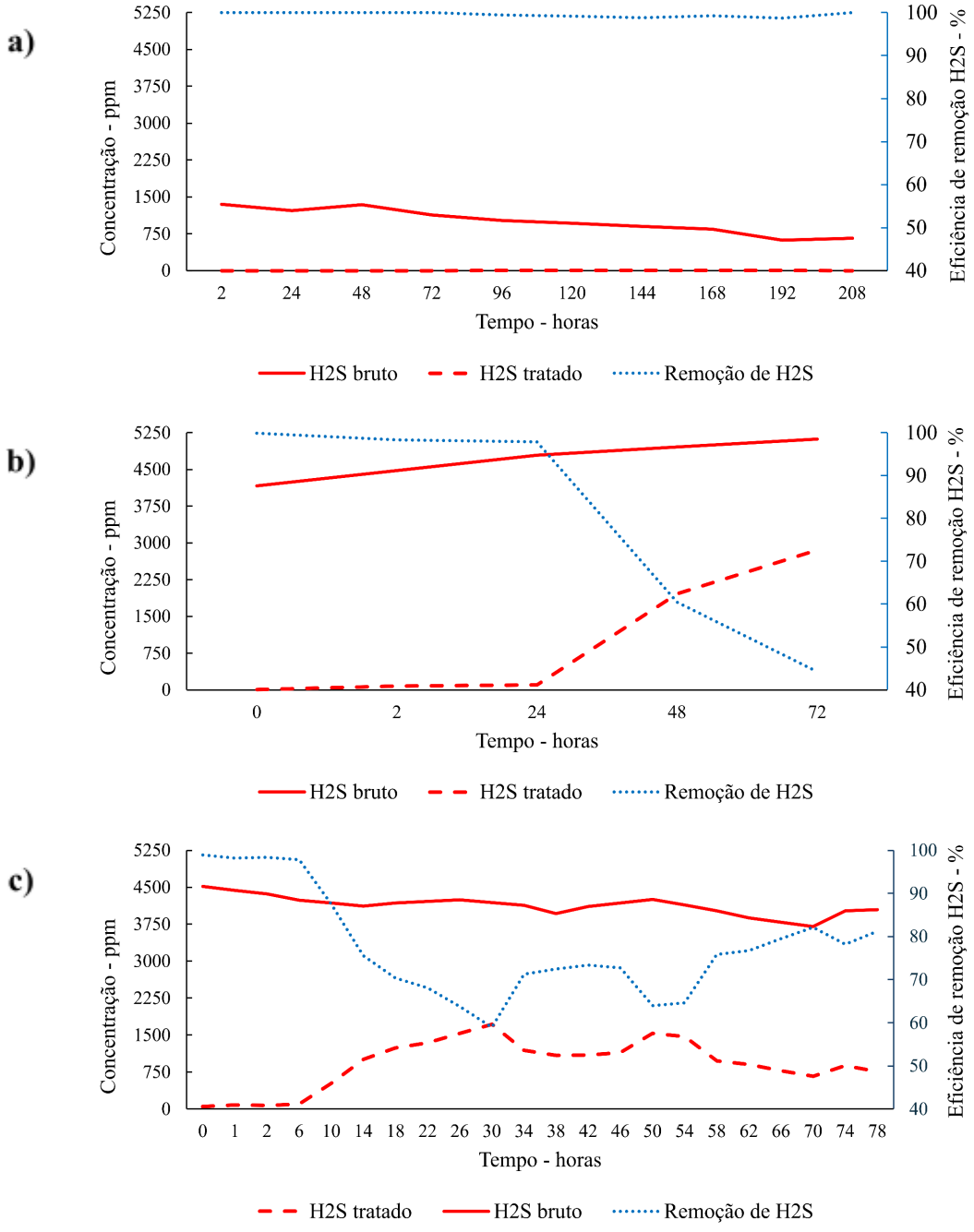
Fonte: da autora (2024). Legenda: a) Resultados da 1º etapa de testes; b) Resultados da 2º etapa de testes; c) Resultados da 3º etapa de testes.

O carvão ativado é um meio adsorvente utilizado para remoção do H_2S do biogás, não sendo eficiente para redução dos demais componentes presentes (Kapłan *et al.*, 2021). Porém, nos gráficos a) e b), é possível observar uma pequena redução do CO_2 e consequente um leve aumento do CH_4 nas primeiras horas, que ocorreu devido a adsorção dos componentes pelo carvão ativado, assim como citado no estudo de Ou *et al.* (2020). Destaca-se que a remoção não foi considerável e ocorreu somente na fase inicial dos testes, não sendo viável como

alternativa para remoção do CO_2 do biogás.

Na Figura 6, é possível observar a concentração de H2S no biogás bruto e tratado, assim como a eficiência de remoção do composto.

Figura 06 - Concentração de H_2S do biogás bruto e após contato com carvão ativado e eficiência de remoção



Fonte: da autora (2024). Legenda: a) Resultados da 1º etapa de testes; b) Resultados da 2º etapa de testes; c) Resultados da 3º etapa de testes.

Conforme esperado, a concentração de H_2S do biogás foi reduzida durante os testes, mantendo-se estável na 1º etapa, porém, mostrou variação nas etapas 2 e 3. Na 1º etapa foi

removido em média 99,54 ± 0,53% do H_2S, nas etapas 2 e 3, quando a concentração era mais alta, as médias foram 80,14 ± 26,03% e 79,55 ± 2,19%, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Ou *et al.* (2020) em seu estudo. Os autores realizaram testes contínuos por um período de 50 dias, nos quais trataram cerca de 5m³ por dia de biogás. Observaram 100% de remoção do H_2S nos primeiros 40 dias, com concentrações de entrada entre 1.400 e 1.500 ppm de H_2S. Entre os dias 40 e 50, o biogás tratado passou a apresentar cerca de 100 ppm de H_2S em sua composição.

Em seu estudo, Ziglioli (2020) avaliou a remoção do H_2S utilizando um protótipo de plástico, utilizando 30g de carvão ativado, instalado em uma linha de biogás de uma propriedade rural, com vazão média de 8 L/min. de biogás. No primeiro ciclo de análises, o biogás não apresentou presença de H_2S na saída até os primeiros 7 minutos, enquanto no segundo ciclo (após regeneração do carvão ativado), não foi detectado o componente nos três primeiros minutos. O autor classificou o carvão ativado como um adsorvente de capacidade de remoção mediana do H_2S, e citou que a regeneração do material não é feita com facilidade. Os resultados obtidos pelo autor demonstram a saturação do carvão ativado, mas reitera-se que diferente do presente estudo, o autor trabalhou com uma pequena quantidade de carvão ativado e alto fluxo de biogás. Já Matiello (2017) utilizou um filtro preenchido com 400g de carvão ativado, dessulfurizando em média 8,78L de biogás por dia, durante quatro dias, obtendo remoção completa do H_2S do biogás, com concentrações entre 451 e 557 ppm, em três rodadas de testes. No presente estudo, foram utilizados 2 kg de carvão ativado e fluxo menor de biogás (em média 2,1 L/min.), devido a isso, na concentração mais baixa avaliada, a remoção foi completa, assim como no estudo de Matiello (2017).

Na 2º etapa dos testes do presente estudo, o biogás bruto apresentava em média 4.700,10 ± 384,00 ppm de H_2S em sua composição. Nesta etapa, o carvão ativado removeu em média 98,68% do H_2S nas primeiras 24 horas, reduzindo para 60,44% nas 48 horas e no final (72 horas), a redução era de 44,25%. Entre a 2º e 3º etapa não houve a troca do carvão ativado, que motivou a queda da eficiência mais rapidamente no 3º teste, cuja média de H_2S no biogás bruto era de 4.131,90 ± 192,65%. Nesta etapa, nas primeiras 6 horas a remoção foi de 98%, com 24 horas 66% e 30 horas 59%, nestes momentos, a concentração de H_2S no biogás bruto era, respectivamente, de 4.390,00 ppm, 4.225,00 ppm e 4.186,00 ppm. A partir deste ponto, manteve-se uma redução média de 74% até o final do teste, que variou entre 81% e 64%. Observa-se que com o aumento da concentração do H_2S, o carvão ativado comercial

utilizado neste estudo reduziu a eficiência de remoção quando comparado ao teste inicial, contendo 1.000 ppm. É possível atingir maiores eficiências, como identificado por Siriwardane *et al.* (2017), que trabalharam com uma concentração inicial de 10.000 ppm de H_2S, alcançando 50 ppm após o tratamento. Estes resultados indicam que ajustes no processo, como redução da vazão de biogás, aumento da área de contato e volume de material adsorvente, além de submeter o carvão ativado ao processo impregnação, auxiliam na maior eficiência de adsorção do H_2S pelo carvão ativado.

O carvão ativado pode ser produzido a partir de diferentes materiais, e diversos estudos avaliaram a capacidade de remoção do H_2S do biogás. Para concentrações mais elevadas do componente no biogás bruto, carvões ativados produzidos a partir do coco e madeira apresentaram boa capacidade de remoção. Elsayed *et al.* (2009) avaliou o coco para preparo do carvão ativado. O biogás utilizado nos testes continha de 3.000 ppm de H_2S, após o processo apresentou 100 ppm. Adib; Bagreev; Bandosz (1999) e Nguyen e Bandosz (2005) também trabalharam com biogás contendo 3.000 ppm de H_2S e utilizaram a madeira para preparo do carvão ativado, alcançando, respectivamente, concentrações de 500 e 100 ppm no biogás tratado.

Os resultados obtidos no presente estudo indicam que o carvão ativado ainda não estava saturado ao final do 3º teste, porém, para concentrações mais altas a remoção não foi efetiva, e para uso do biogás como fonte energética, seria necessário uma segunda etapa de purificação, visto que o biogás tratado apresentava em média 914,70 ± 502,81% de H,S em sua composição, ficando abaixo de 100 ppm somente até a hora 6 do ensaio e na 2º etapa a partir das 24 horas do teste já apresentava teor acima de 104 ppm, com 48 horas 1.960,00 ppm e 2.855,00 ppm em 72 horas. Neste sentido, o uso do carvão ativado aliado a outro método de purificação pode apresentar resultados satisfatórios na remoção de altas concentrações de H_2S do biogás, reduzindo custos e aumentando a vida útil do filtro de carvão ativado.

3. PURIFICAÇÃO COM MICROALGAS

Este capítulo refere-se aos objetivos específicos 2 e 3, respectivamente: "Desenvolver um protótipo de fotobiorreator e coluna de transferência para cultivo de microalgas" e "Avaliar a eficiência da remoção de CO_2 e H_2S do biogás pelas microalgas da espécie *Chlorella sorokiniana*".

Em geral, o biogás é composto por 55-65% de metano (CH_4), 35-45% de dióxido de carbono (CO_2) e traços de outros gases, entre eles o sulfeto de hidrogênio (H_2S), composto tóxico e corrosivo, prejudicial a infraestrutura, exigindo remoção (Konrad *et al*., 2016; Dalpaz *et al*., 2020). Além disso, removendo o CO_2 melhoramos o poder calorífico do biogás (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022). Nesse contexto, sistemas de purificação utilizando microalgas têm se mostrado promissores neste processo, são ecofriendly e podem remover simultaneamente o CO_2 e H_2S, aumentando a concentração de metano no biogás (Cea-Barcia *et al*., 2018). Assim, foram realizados testes de purificação do biogás, utilizando a microalga *Chlorella sorokiniana,* e a partir dos resultados obtidos, foi elaborado um artigo científico, publicado na Revista Caderno Pedagógico (ISSN 1983-0882, Qualis CAPES A2), intitulado "*Photosynthetic process for removing H2S and CO2 from biogas using the microalgae Chlorella sorokiniana*". A seguir são apresentados o resumo do artigo e os dados da publicação.

Biogas is an alternative source of energy that contributes on reducing the emissions of polluting gas in comparison to fossil fuels as well as promoting the treatment of organic waste. However depending on the substrate used in its production, it may have a high concentration of carbon dioxide (CO_2) and hydrogen sulfide (H_2S); in these cases a treatment is necessary to make its use viable, for comply with current legislation and avoid damage to materials and health. Currently, the most widely used methods are physical-chemical, such as absorption, adsorption, membrane separation, and Pressure Swing Adsorption (PSA), among others. However, these methods are expensive and generate waste that needs to be treated. In this sense, biological methods have proved to be promising alternatives, especially photosynthetic processes using microalgae. This study aimed to evaluate the

efficiency in removing CO_2 and H_2S from biogas through a bench-scale purifier prototype consisting of a photobioreactor and an absorption column, in a continuous biogas flow system. The experiment lasted 240 hours, during which 9 m³ of biogas were treated. In the first 24 hours, the flow rate was 1 L/min, resulting in an average removal of 60.8% of H_2S and 20.2% of CO_2. Between 24 hours and 240 hours of the study, the average biogas flow rate was 0.54 L/min, and an improvement in removal was observed, reaching 83.4% of H_2S and 29.7% of CO_2. The system showed efficiency in biogas treatment. However, possibilities for improvement were identified in terms of biogas flow and process, which could further enhance the results presented here.
Keywords: Biogas. Microalgae. Purification. H_2S. CO_2.

MÖRS, J., *et al*. Photosynthetic process for removing H_2S and CO_2 from biogas using the microalgae *Chlorella sorokiniana*. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 4, p. e3723, 2024. https://doi.org/10.54033/cadpedv21n4-078.

4. DISCUSSÃO GERAL

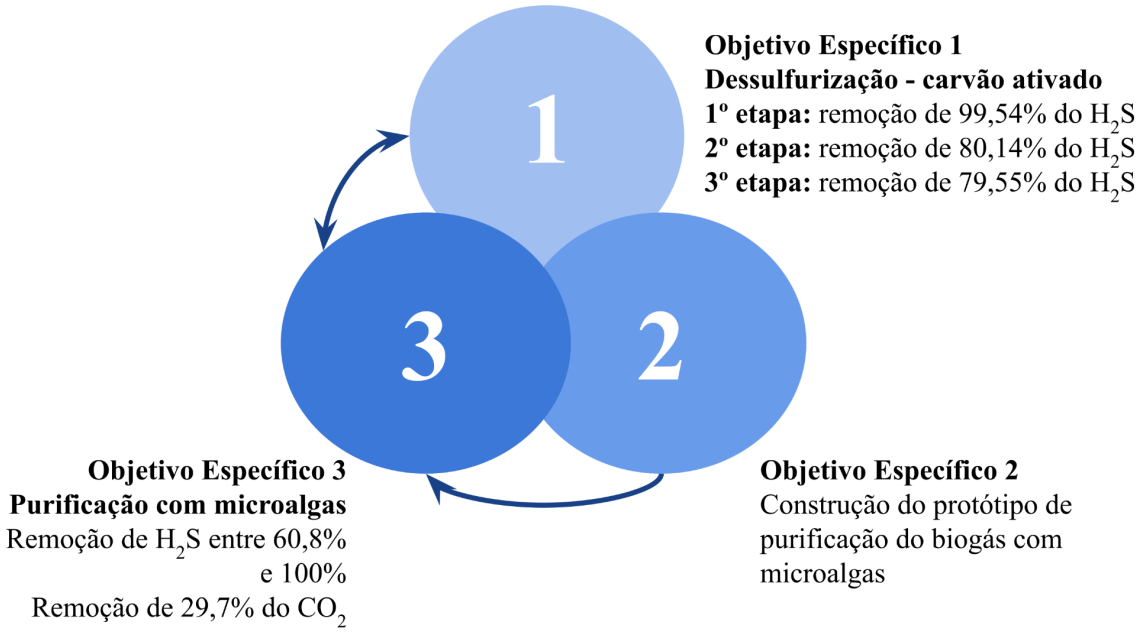
A geração de biogás para produção de metano tem gerado interesse crescente, pois os substratos derivados de biomassa residual são valorizados por não emitirem gases de efeito estufa e podem ser utilizados como biofertilizantes (Ardolino *et al.*, 2021). A energia produzida a partir do biogás pode ser explorada para geração de calor, eletricidade, liquefação em metanol ou como combustível gasoso, podendo inclusive, ser inserido na rede de gás natural (Konrad *et al*., 2016; Zabed *et al.*, 2020). Para ser utilizado nestas aplicações, a qualidade do biogás precisa ser melhorada através da remoção de compostos indesejáveis, como o H_2S e CO_2. Diversas tecnologias consolidadas são utilizadas para purificação do biogás, e novas estão surgindo (Khan *et al*., 2021).

Uma aplicação importante do biometano, produzido através da purificação do biogás, é a substituição do diesel em veículos pesados, reduzindo a emissão de gases do efeito estufa do setor de transportes, maior responsável pelas emissões de carbono no Brasil (EPE, 2022; Khan *et al*., 2021). Porém, para atender a demanda, uma quantidade significativa de biometano é necessário, portanto, novas tecnologias de purificação vem sendo amplamente estudadas e aplicadas. Entre estas tecnologias, o uso de microalgas vem se consolidando para purificação do biogás, neste processo, a remoção do CO_2 ocorre através do processo de fotossíntese realizado pelas microalgas, que utilizam o carbono como nutriente. Enquanto a remoção do H_2S ocorre pela ação das bactérias oxidantes de enxofre presentes nos fotobiorreatores, que se desenvolvem devido a liberação de O_2 durante a fotossíntese (Del Rosario Rodero *et al.*, 2019).

Apesar dos estudos terem demonstrado bons resultados de purificação do biogás pelas microalgas, em concentrações mais elevadas de H_2S, muitas vezes não é atingida a remoção

necessária para uso como biocombustível (Xie *et al*., 2023; Castro *et al*., 2022; Junges, 2021; González-Sánchez e Posten, 2017), pois o H_2S pode vir a inibir o desenvolvimento das microalgas em biogás com concentrações de H_2S > 200 ppm (González-Sánchez e Posten, 2017). Dessa forma, o processo de dessulfurização utilizando o carvão ativado como meio adsorvente pode ser uma alternativa interessante para complementar o sistema de purificação, atingindo a composição especificada pela legislação vigente para uso do biogás como biometano. Neste sentido, este trabalho buscou avaliar a eficiência de dessulfurização do biogás através da adsorção e desenvolver um protótipo para purificação do biogás pelo método fotossintético, utilizando microalgas da espécie *Chlorella sorokiniana*. Retomando os objetivos específicos desta dissertação apresentados no Capítulo 1, pode-se relacionar os seus resultados e conclusões parciais como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Inter-relações entre os objetivos específicos desta pesquisa e resultados obtidos



Fonte: da autora (2024).

Através da Figura, pode-se perceber que os objetivos específicos propostos foram atendidos. O Objetivo Específico 1 buscou a análise da dessulfurização do biogás, ou seja, remoção do H_2S. Os resultados obtidos foram positivos e demonstraram a capacidade de adsorção do H_2S, porém, em altas concentrações (acima de 4.000 ppm) o carvão não demonstrou capacidade de remoção completa. Ainda, o carvão ativado não possui capacidade de adsorção de compostos presentes no biogás como CO_2 e O_2, portanto, quando o teor destes elementos estão elevados, outros métodos de remoção são necessários.

O Objetivo Específico 2 previa o desenvolvimento de um protótipo de purificação do biogás pelo método fotossintético, utilizando microalgas da espécie *Chlorella sorokiniana*. E o Objetivo Específico 3 a análise da eficiência do sistema proposto. O protótipo foi desenvolvido com base no proposto por Castro *et al*. (2022), neste estudo, alguns ajustes no processo foram realizados, porém, verificou-se que mais ajustes e controles são necessários para uma melhor eficiência do sistema, principalmente controle da vazão do biogás, redução no tamanho das bolhas de biogás injetadas na coluna de transferência e controle do pH.

Por fim, através dos resultados obtidos, é possível verificar a necessidade de complementação dos sistemas de dessulfurização e purificação, principalmente para concentrações elevadas de CO_2 e H_2S. Outro aspecto a ser considerado é a aplicação do biogás purificado, pois dependendo da sua aplicação final, diferentes concentrações dos componentes do biogás são aceitos. Conforme Cano *et al.* (2018), devido à maturidade dos processos físico-químicos, a redução dos seus impactos ambientais é uma tarefa árdua, além disso, estes processos estão consolidados, portanto, preferidos em relação aos biológicos devido ao conhecimento limitado por parte dos produtores de biogás. No entanto, uma transição é esperada, uma vez que os processos biológicos apresentam custos operacionais mais baixos e são mais sustentáveis em termos ambientais.

5. CONCLUSÃO

Por meio desta dissertação, foi possível concluir que:

- O processo de dessulfurização do biogás pelo método de adsorção com carvão ativado é eficiente, porém, para concentrações elevadas de H_2S necessita de uma complementação no processo para sua remoção completa;
- Ajustes na vazão do biogás e área de contato com o carvão ativado podem melhorar a eficiência do processo;
- O método fotossintético de purificação do biogás é uma alternativa viável, de fácil operação;
- Ajustes na vazão do biogás, controle do pH e no tamanho das bolhas do biogás injetado na coluna de transferência podem vir a melhorar significativamente a eficiência do sistema;
- O aumento do O_2 no biogás após o tratamento pelas microalgas pode limitar sua aplicação, portanto, ajustes são necessários ou um processo de remoção de O_2 deve ser implementado;
- Em novos estudos, diferentes espécies de microalgas podem ser avaliadas para o processo de purificação do biogás;
- O processo de purificação do biogás pode ser realizado utilizando diferentes métodos em sequência, para garantir que os compostos indesejáveis sejam removidos efetivamente.

REFERÊNCIAS

ADIB, F.; BAGREEV, A.; BANDOSZ, T. J. Effect of pH and surface chemistry on the mechanism of H2S removal by activated carbons. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 216, n. 2, p. 360-369, 1999.

ÁNGELES, R. *et al*. Optimization of photosynthetic biogas upgrading in clo-sed photobioreactors combined with algal biomass production. **Journal of Water Process Engineering**, v. 38, p. 101554, 2020.

ANGELIDAKI, I. *et al*. **Biogas Upgrading: Current and Emerging Technologies**. Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels, p. 817–843, 2019.

ARDOLINO, F. *et al*. Biogas-tobiomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110588, 2021.

AMIN, F. R. *et al.* Functions of bacteria and archaea participating in the bioconversion of organic waste for methane production. **Science of The Total Environment**, v. 763, p. 143007, 2021.

AWITE. Dados técnicos – Awiflex cool/Awiflex cool XL. Florianópolis, SC, 2022.

BAK, Chul-U., *et al*. Multi-stage adsorptive purification process for improving desulfurization performance of biogas. **Separation and Purification Technology**, v. 227, p. 115702, 2019.

BECKER, C. M. *et al*. Technologies for biogas desulfurization - An overview of recent studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, 2022.

BRAGA, B. *et al*. **Introdução à Engenharia Ambiental**: o desafio do desenvolvimento sustentável. Porto Alegre: Bookman, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente,

2022. Disponível em: https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/. Acesso em: 06 jun. 2023.

CANO, P. I. *et al*. Life cycle assessment of different physical-chemical and biological technologies for biogas desulfurization in sewage treatment plants. **Journal of cleaner production**, v. 181, p. 663-674, 2018.

CASTRO, A. A. *et al.* Biogas desulfurization by photosynthetic process with microalgae and absorption by washing with water. **Research, Society and Development**, v. 11, 2022.

CEA‐BARCIA, G., *et al.* Biogas purification via optimal microalgae growth: A literature review. **Biotechnology progress**, v. 34, n. 6, p. 1513-1532, 2018.

COSTA, B. S.; DIZ, J. B. M.; OLIVEIRA, M. L. de. Cultura de consumismo e geração de resíduos. **Revista Brasileira de Estudos Políticos**, n. 116, p. 159-183, 2018.

CURIEL-ESPARZA, J. *et al*. Collaborative elicitation to select a sustainable biogas desulfurization technique for landfills. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 1334-1344, 2019.

DALPAZ, R., *et al*. Using biogas for energy cogeneration: An analysis of electric and thermal energy generation from agro-industrial waste. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 40, p. 100774, 2020.

DAS, J.; RAVISHANKAR, H.; LENS, P. N. L. Biological biogas purification: Recent Developments, challenges and future prospects. **Journal of Environmental Management**, v. 304, p. 114198, 2022.

DEL ROSARIO RODERO, María *et al*. Technology validation of photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale algal-bacterial photobioreactor. Bio-resource technology, v. 279, p. 43-49, 2019.

DEMANBORO, A. C.; BERGAMASCHI, A. C. O conceito de soberania e suas implicações sobre o aquecimento global antrópico. **Rede - Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 14, n. 1, p. 103-118, 2020.

ELSAYED, Y. *et al*. Desulfurization of air at high and low H2S concentrations. **Chemical Engineering Journal**, v. 155, n. 3, p. 594-602, 2009.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023. Acesso em: 10 abril 2024.

GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, A.; POSTEN, C. Fate of H2S during the cultivation of Chlorella sp. deployed for biogas upgrading. **Journal of environ-mental management**, v. 191, p. 252-257, 2017.

JUNGES, E. L. **Processo biológico de purificação do biogás a partir de microalgas.** 2021. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2021.

KAPŁAN, M. *et al*. Raw Biogas Desulphurization Using the Adsorption-Absorption Technique for a Pilot Production of Agricultural Biogas from Pig Slurry in Poland. **Energies**, v. 14, n. 18, p. 5929, 2021.

KHAN, M. U. *et al*. Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, 2021.

KONRAD, O. *et al*. **Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano**. 1 ed. Lajeado: Ed. da Univates, 2016.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2 ed. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022. p. 15-28.

LIU, D. *et al*. Sorbents for hydrogen sulfide capture from biogas at low temperature: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.18, n.1, p. 113-128, 2020.

MARCUCCI, L. W. **Otimização do planejamento de produção de biogás em uma bateria de biodigestores**. 2021. Tese (Doutorado em Biometria) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2021.

MATIELLO, S. **Avaliação da eficiência de um filtro de adsorção com carvão ativado na purificação de biogás proveniente da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) - Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2017.

MIYAWAKI, B.; *et al*. Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment. **Renewable Energy**, v. 163, p. 1153-1165, 2021.

MILANEZ, A. Y. *et al*. **Biogás de Resíduos Agroindustriais:** Panoramas e perspectivas. BNDES Setorial, v. 47, p. 221-226, 2018.

MOREIRA, L. C. *et al*. Simulation and economic evaluation of process alternatives for biogas production and purification from sugarcane vinasse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 163, p. 112532, 2022.

NGUYEN, D.; BANDOSZ, T. J. Activated carbons with metal containing bentonite binders as adsorbents of hydrogen sulfide. **Carbon**, v. 43, n. 2, p. 359-367, 2005.

NGUYEN, D.; KHANAL, S. K. A little breath of fresh air into an anaerobic system: How microaeration facilitates anaerobic digestion process. **Biotechnology Advances**, v. 36, p. 1971-1983, 2018.

O QUE é desenvolvimento sustentável?. Rio de Janeiro: ONU Brasil, 2016. 1 vídeo (2 min).

Publicado pelo canal ONU Brasil. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=Y8OH66wXTXI. Acesso em: 11 maio 2023.

OU, H. W., *et al.* Long-term evaluation of activated carbon as an adsorbent for biogas desulfurization. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 70, n. 6, p. 641-648, 2020.

RODRIGUES, S. C. M. de; *et al*. Os recursos naturais no processo de desenvolvimento econômico capitalista: uma breve reflexão. **SEMIOSES: Inovação, Desenvolvimento e Sustentabilidade**, v. 13, n. 4, p. 50-68, 2019.

SIRIWARDANE, I. W. *et al*. Synthesis and characterization of nano magnesium oxide impregnated granular activated carbon composite for H2S removal applications. **Materials & Design,** v. 136, p. 127-136, 2017.

UNITED NATIONS. **Transforming our world**: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda. Acesso em: 11 maio 2023.

ZABED, H. M.; *et al*. Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109503, 2020.

ZIGLIOLI, E. **Estudo Da Dessulfurização De Biogás Utilizando Adsorventes Hidróxidos Duplos Lamelares (Hdl's), Carvão Ativado E Polímero Macronet Mn200**. 2020. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Campus Medianeira, Medianeira, 2020.

XIE, Tonghui *et al.* Biogas conditioning and digestate recycling by microalgae: Acclimation of Chlorella vulgaris to H2S-containing biogas and high NH4-N diges-tate and effect of biogas: Digestate ratio. **Chemical Engineering Journal**, v. 453, p. 139788, 2023.

WANG, C. *et al*. Renewable energy output, energy efficiency and cleaner energy: Evidence from non-parametric approach for emerging seven economies. **Renewable Energy**, v. 198, p. 91 - 99, 2022