

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

INSTITUTO DE QUÍMICA

ENGENHARIA QUÍMICA

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DO
BIOGÁS UTILIZANDO O SOFTWARE DWSIM**

João Luis Moraes Costa

Campo Grande – MS

2023

João Luis Moraes Costa

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DO
BIOGÁS UTILIZANDO O SOFTWARE DWSIM**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

Orientadora: Prof.(a) Dr.(a) Patrícia Cristina de Araújo
Puglia de Carvalho

Campo Grande - MS

2023

João Luis Moraes Costa

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS
UTILIZANDO O SOFTWARE DWSIM**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

Data de aprovação: 27 de novembro de 2023.

Prof.(a) Dr.(a) Patrícia Cristina de Araújo Puglia de Carvalho
Doutora em Engenharia Química
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof.(a) Dra. Janaína dos Santos Ferreira
Doutora em Engenharia Química
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Celso Murilo dos Santos
Doutor em Engenharia Química
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Campo Grande - MS

2023

RESUMO

Atualmente é evidente a preocupação da sociedade com a preservação ambiental. Nesse sentido, a busca por fontes renováveis de energia (solar, hidráulica, eólica e biomassa) tem se tornado uma meta de muitas pesquisas científicas propiciando avanços tecnológicos em várias áreas do conhecimento. É nesse contexto, que o biogás surge como uma alternativa sustentável e com grande potencial, econômico e ambiental. Durante a produção do biogás é gerado, além do metano (gás de interesse), alguns subprodutos, como por exemplo, o sulfeto de hidrogênio, que é altamente corrosivo em sistemas de queima. Desse modo, para o uso adequado do biogás é necessário um processo de tratamento, que irá remover os subprodutos indesejáveis e concentrar o metano. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo propor um sistema de tratamento do biogás proveniente da agroindústria, utilizando colunas de absorção com a água como solvente através da simulação. O estudo foi realizado no simulador DWSIM, utilizando a extensão CHEMSEP e o modelo termodinâmico de Peng Robinson avançado. A simulação comparou três cenários diferentes, simulando o processo com uma a três colunas de absorção e regeneração em série. Outro ponto importante foi a validação da simulação com autores de referência que propuseram a mesma ideia, utilizando softwares e modelos termodinâmicos diferentes. A partir da simulação foi possível obter perfis das frações molares, comparar os comportamentos com as referências bibliográficas e ainda otimizar o processo determinando o número de estágios teóricos, pressão na coluna e a vazão de água na entrada. Os resultados indicaram que o sistema avaliado foi capaz de concentrar o biogás com valores acima dos valores de referência encontrados na literatura, conseguindo concentrar até 97 % de metano (fração molar), potencializando o poder de queima do gás.

Palavras chave: Biogás, simulação, absorção e purificação.

ABSTRACT

Currently, there is a clear concern in society regarding environmental preservation. In this sense, the search for renewable energy sources (solar, hydraulic, wind, and biomass) has become a goal of many scientific research endeavors, leading to technological advancements in various fields of knowledge. In this context, biogas emerges as a sustainable alternative with significant economic and environmental potential. During biogas production, in addition to methane (a gas of interest), some by-products are generated, such as hydrogen sulfide, which is highly corrosive in combustion systems. Therefore, for the proper use of biogas, a treatment process is necessary to remove undesirable by-products and concentrate methane. In light of this, the present study aims to propose a biogas treatment system from agro-industry, using absorption columns with water as a solvent through simulation. The study was conducted using the DWSIM simulator, employing the CHEMSEP extension and the advanced Peng Robinson thermodynamic model. The simulation compared three different scenarios, simulating the process with one to three absorption and regeneration columns in series. Another important aspect was the validation of the simulation with reference authors who proposed the same idea using different software and thermodynamic models. From the simulation, it was possible to obtain profiles of molar fractions, compare behaviors with bibliographic references, and optimize the process by determining the number of theoretical stages, column pressure, and water flow at the inlet. The results indicated that the evaluated system was capable of concentrating biogas with values above the reference values found in the literature, achieving concentrations of up to 97% methane (molar fraction), enhancing the gas's combustion power.

Keywords: Biogas, simulation, absorption and purification.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, por todo amor e apoio durante esses anos de graduação.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Química que me apoiaram e compartilharam comigo momentos incríveis durante essa jornada.

A minha orientadora Professora Patrícia Puglia por todo apoio fornecido durante o desenvolvimento deste estudo e por todos os conselhos durante a trajetória acadêmica.

A todos os meus professores, Patrícia, Celso, Janaína, Rebecca, Carlos, Sérgio, João Renato e Marco, por todo suporte prestado, por serem minha inspiração como profissionais e, principalmente, pela dedicação incomparável em fazer um curso de Engenharia Química ser o que é hoje.

A Universidade Federal do Mato Grosso do Sul e ao Instituto de Química por me fornecerem estrutura e condições para realizar minha graduação.

Gostaria de destacar a minha gratidão a minha mãe, meu pai e meu irmão por serem meu alicerce durante minha trajetória no curso de Engenharia Química.

Gostaria de agradecer minha namorada, Bruna Tainá, por ser minha companheira e maior incentivadora nessa caminhada, suas palavras e incentivo foram parte da minha força de vontade para concluir essa graduação.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta conquista.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.2	Objetivos Específicos	18
2	ASPECTOS TEÓRICOS	19
2.1	Formação do Biogás	19
2.2	Equipamentos Industriais.....	24
2.2.1	Biodigestores de fluxo hidráulico descontínuo.....	25
2.3	Fontes de Biomassa.....	28
2.4	Tratamento do biogás	29
2.5	O modelo termodinâmico	32
3	METODOLOGIA	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5	CONCLUSÃO	62
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	APÊNDICE 1 – Dados para validar a eficácia do DWSIM na simulação	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Processo de Formação do Biogás.....	19
Figura 1.2 - Potencial Brasileiro de Biogás por Fonte (Nm ³ /ano).....	19
Figura 1.3 - Sistema de Absorção Gasosa utilizando Água.....	20
Figura 2.1 - Representação das etapas da digestão anaeróbia.....	22
Figura 2.1.1 - Fluxograma do Processo de Produção do Biogás.....	24
Figura 2.2.1 - Fases de operação de um reator em batelada	25
Figura 2.2.2.1 - Biodigestor de fluxo contínuo.....	26
Figura 2.2.2.2 - Biodigestor de fluxo contínuo.....	26
Figura 2.2.2.3 - Biodigestor Upflow Anaerobic Sludge Blanket.....	27
Figura 2.2.2.4 - Biodigestor CSTR.....	28
Figura 2.4 - Adsorção por variação de pressão.....	30
Figura 2.4.1 - Separação por tecnologia criogênica.....	31
Figura 2.4.2 - Separação por membrana.....	31
Figura 2.4.3 - Separação Biológica.....	32
Figura 3.1 - Diagrama de blocos das fases experimentais do estudo.....	36
Figura 3.2 - Tela de seleção do pacote termodinâmico no DWSIM.....	37
Figura 3.3 - Seleção dos componentes.....	39
Figura 3.4 - Parâmetros de entrada no sistema.....	40
Figura 3.5 - Sistema com uma coluna.....	41
Figura 3.6 - Sistema com duas colunas.....	41
Figura 3.7 - Sistema com três colunas.....	42
Figura 3.8 - Aba para seleção dos dados do CHEMSEP.....	43
Figura 3.9 - Aba de simulação de colunas no CHEMSEP.....	44
Figura 4.1 - Fração Molar de CH ₄ versus Número de Estágios Teóricos.....	47
Figura 4.2 - Fração Molar de CO ₂ versus Número de Estágios Teóricos.....	47
Figura 4.3 - Fração Molar de H ₂ O versus Número de Estágios Teóricos.....	48
Figura 4.4 - Frações de purificação de Biogás em trabalho de comparação.....	49
Figura 4.5 - Fração Molar de CH ₄ versus Vazão de água.....	50
Figura 4.6 - Fração Molar de CO ₂ versus Vazão de água.....	51
Figura 4.7 - Fração Molar de H ₂ O versus Vazão de água.....	51

Figura 4.8 - Frações de purificação de biogás.....	52
Figura 4.9 - Fração Molar de CH_4 versus Pressão do Sistema.....	53
Figura 4.10 - Fração Molar de CO_2 versus Pressão do Sistema.....	54
Figura 4.11 - Fração Molar de H_2O versus Pressão do Sistema.....	54
Figura 4.12 - Frações de Purificação de Biogás.....	55
Figura 4.13 - Sistema com uma coluna.....	56
Figura 4.14 - Poder Calorífico Inferior do Biogás versus Fração de Metano.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.3 - Fontes de Biomassa.....	29
Tabela 2.5.1 - Modelos Termodinâmicos e suas características.....	33
Tabela 2.5.2 - Aplicabilidade dos modelos termodinâmicos.....	34
Tabela 2.5.3 - Aplicabilidade orientada para o DWSIM.....	35
Tabela 3.1 - Composição do Biogás Bruto.....	38
Tabela 3.2 - Dados do Biogás Bruto.....	39
Tabela 3.3 - Quantidade de Equipamentos.....	45
Tabela 4.1 - Valores iniciais de simulação para número de estágios.....	46
Tabela 4.2 - Valores iniciais de simulação para vazão de água.....	50
Tabela 4.3 - Valores iniciais de simulação para pressão do sistema.....	53
Tabela 4.4 - Dados gerais do sistema para uma coluna.....	57
Tabela 4.5 - Dados das correntes de biogás.....	57
Tabela 4.6 - Dados do sistema de regeneração da água.....	57
Tabela 4.7 - Dados gerais do sistema para duas colunas.....	58
Tabela 4.8 - Poder Calorífico Inferior do Biogás.....	59
Tabela 4.9 - Dados energéticos das correntes de biogás.....	60
Tabela 4.10 - Economia das fontes de biomassa.....	61

NOMENCLATURAS

ABIOGÁS	Associação Brasileira de Biogás
BIP	Parâmetros de Interação Binário
BLC	Biodigestor Lagoa Coberta
BTL	Biomass to Liquid
CAPEX	Capital Expenditure
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor
ELV	Equilíbrio Líquido Vapor
NRTL	Non Random Two Liquid
OPEX	Operational Expenditure
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PSA	Pressure Swing
PVC	Policloreto de Vinil
SRV	Soav Redlich Kwong
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
WS	Water Scrubbing

1 INTRODUÇÃO

O biogás é uma mistura de gases formada pela digestão anaeróbia de resíduos vegetais e animais (matéria orgânica). É composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono (cerca de 95%) e, nitrogênio e ácido sulfídrico (aproximadamente 5%), entre outros compostos. Em sistemas agroindustriais, é uma fonte alternativa de energia para aquecedores de galpões e conjunto-motor de eletricidade, contudo, ainda é necessário desenvolver novas tecnologias para melhorar a sua eficiência. (CARDOSO, 2011)

Este composto foi descoberto há cerca de 400 anos e, durante a Segunda Guerra Mundial, foi amplamente explorado como combustível, uma vez que a comercialização de matéria-prima energética foi afetada pelo cenário global, proporcionando a criação e o aproveitamento de novas fontes de energia. Considerando o contexto econômico mundial, sabe-se que a produção do biogás com fins energéticos mais que dobrou nos últimos dez anos. Isso ocorreu, pois, alguns países da Europa e da América do Norte (Estados Unidos) não possuem um alto potencial hidrelétrico como o Brasil. (SCARLAT, 2018)

Na indústria, a conversão de biogás em biometano é uma solução eficaz, pois aumenta a concentração de metano no composto para valores acima de 90%, gerando um acréscimo no poder calorífico dele, tornando-o apto para ser utilizado e, até mesmo, comercializado. Para isso, é imprescindível utilizar técnicas de operações unitárias como absorção e dessorção. (NOYOLA, 2006)

A absorção é uma operação unitária de contato gás-líquido na qual um ou mais componentes de uma mistura gasosa são transferidos para a fase líquida por causa de sua dissolução preferencial no solvente líquido, sendo desse modo uma excelente alternativa para a remoção dos contaminantes presentes no biogás.

Considerando a relevância do tratamento do biogás e o potencial da operação unitária para a remoção dos seus principais contaminantes, o presente trabalho avaliou o tratamento em colunas de absorção via simulador de processos químicos.

1.1 Objetivos

Dada a importância do tratamento do biogás, o presente trabalho tem como objetivo propor um modelo de simulação utilizando o software DWSIM para purificar o biogás até valores de composição de metano próximo aos valores encontrados na literatura de referência.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os perfis de composição do biogás (fração molar de metano, dióxido de carbono e água) tratado em relação aos diferentes números de estágios da coluna.
- Avaliar os perfis de composição do biogás (fração molar de metano, dióxido de carbono e água) com o aumento da vazão mássica de água de entrada na coluna e número de estágios teóricos fixos.
- Avaliar os perfis de composição do biogás (fração molar de metano, dióxido de carbono e água) com a variação da pressão da coluna, número de estágios teóricos fixos e vazão de água fixa.
- Comparar os dados da simulação no DWSIM com dados da literatura científica utilizando outros softwares, a fim de validar a simulação.
- Analisar a influência da concentração do metano usando uma ou mais colunas associadas em série.
- Avaliar se o tratamento proposto é capaz de gerar um biogás tratado com capacidade de queima eficiente a ponto de proporcionar economia em relação a outras fontes de combustíveis tradicionais de caldeiras e queimadores industriais.

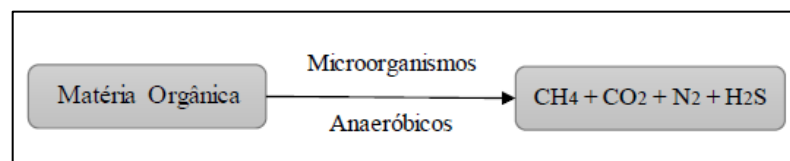
2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Formação do Biogás

O biogás é proveniente da digestão anaeróbia da vinhaça gerada pela indústria sucroalcooleira e tem se mostrado uma alternativa promissora em relação aos combustíveis não renováveis atualmente utilizados. (SCARLAT, 2018)

O processo de formação do biogás de forma simplificada é apresentado na Figura 1.1.

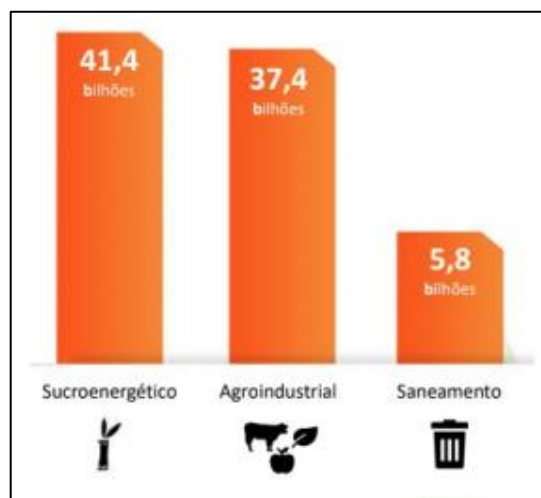
Figura 1.1 - Processo de Formação do Biogás



Fonte: MOREIRA *et al*, 2021

O Brasil é um potencial produtor desse combustível uma vez que é um dos dez países mais populosos do mundo e, conseqüentemente, produz muito resíduo urbano, o qual é uma importante “matéria-prima” para produção do gás. Além disso, no território brasileiro, há uma forte presença agroindustrial e sucroenergética capazes de gerar biomassa como subproduto da produção em larga escala, conforme mostra o gráfico da Figura 1.2. (ABIOGAS,2018)

Figura 1.2 - Potencial Brasileiro de Biogás por Fonte (Nm³/ano)

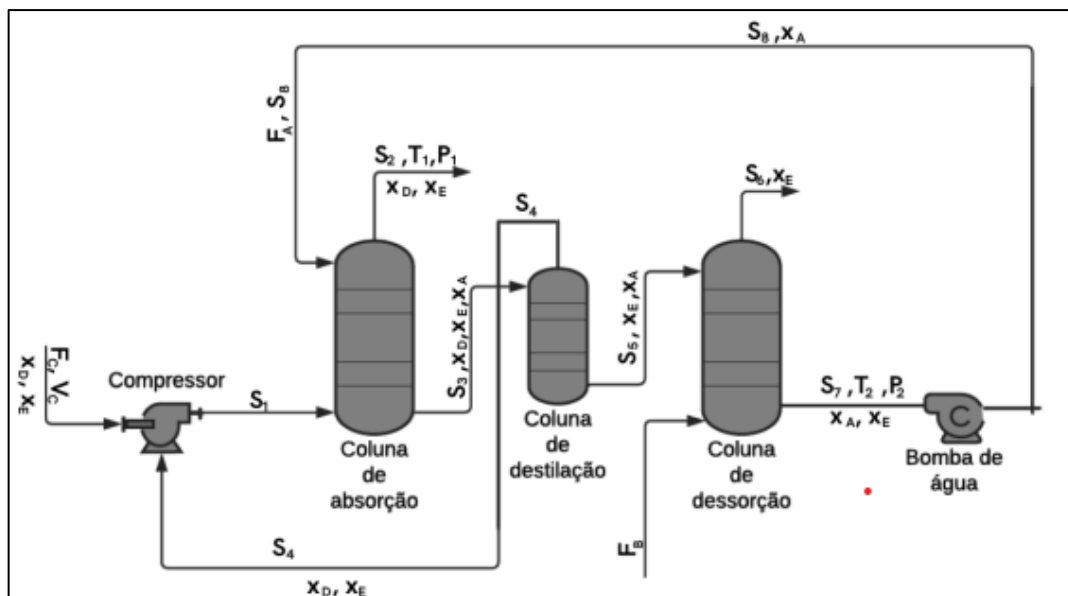


Fonte: ABIOGAS (2018)

Existem vários procedimentos científicos capazes de tratar e purificar o biogás, como a adsorção em leito fixo, absorção com água sob alta pressão, entre outras formas. De acordo com estudos da literatura científica, o último método é o de maior destaque pois além do baixo custo (CAPEX), utiliza apenas água pressurizada, reduzindo assim despesas operacionais com solventes. Ainda, nesta técnica, reutiliza-se a água do processo pois ao ser despressurizada, ela é regenerada e retorna à operação, sendo além de tudo, um processo sustentável e com baixo impacto ambiental. (SCARLAT, 2018)

A metodologia acima descrita é apresentada de forma simplificada na Figura 1.3.

Figura 1.3 - Sistema de Absorção Gasosa utilizando Água



Fonte: Adaptado de ACCIOLY *et al.*, 2017

O uso de membranas na separação de gases indesejáveis presentes nessa mistura permite melhorar os processos de geração de energia alternativa com o mínimo de impacto ao ecossistema. A autora destaca ainda a importância das fontes renováveis de energia na redução das emissões de gases de efeito estufa e apresenta um processo genérico de purificação de gases antes de sua injeção na rede de gás natural. A tecnologia de membranas para o tratamento de biogás utiliza membranas poliméricas para separar os gases, sendo eficiente na remoção de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases indesejáveis. (TRENTIN, 2017)

Segundo TRENTIN (2017), a purificação do biogás que tem o objetivo de remover as impurezas e compostos indesejáveis envolve uma série de etapas, conforme é descrito abaixo.

1. Remoção de partículas e umidade: Nesta etapa, as partículas sólidas são separadas do biogás usando filtros. Além disso, a umidade presente no biogás é removida por meio de um separador ou desumidificador.

2. Remoção de dióxido de carbono: O CO_2 é removido do biogás para aumentar o teor de metano (CH_4). Isso é feito por meio de processos de absorção química ou física. Na primeira técnica, uma solução alcalina como a de amina, é utilizada para reagir e capturar o CO_2 . Já na segunda metodologia, alguns líquidos seletivos como a água são usados para absorver o CO_2 .

3. Remoção de compostos sulfurados: Compostos sulfurados, como o ácido sulfídrico (H_2S), são removidos do biogás devido ao seu odor desagradável e efeitos corrosivos. A remoção destes pode ser feita por processos de absorção física ou química. No primeiro caso, um líquido solvente seletivo, como a água, é usado para capturar os compostos sulfurados. Já no segundo caso, o H_2S reage com agentes químicos, como o peróxido de hidrogênio, para ser convertido em enxofre elementar.

4. Remoção de traços de oxigênio: O oxigênio presente em pequenas quantidades no biogás pode ser indesejável pois pode causar problemas de corrosão e explosões. Para removê-lo, realiza-se os processos de adsorção com a utilização de peneiras moleculares ou zeólitas.

5. Filtração final e secagem: Após as etapas anteriores, o biogás passa por uma filtração final para remover quaisquer impurezas residuais. Além disso, a secagem pode ser necessária para reduzir ainda mais a umidade da mistura.

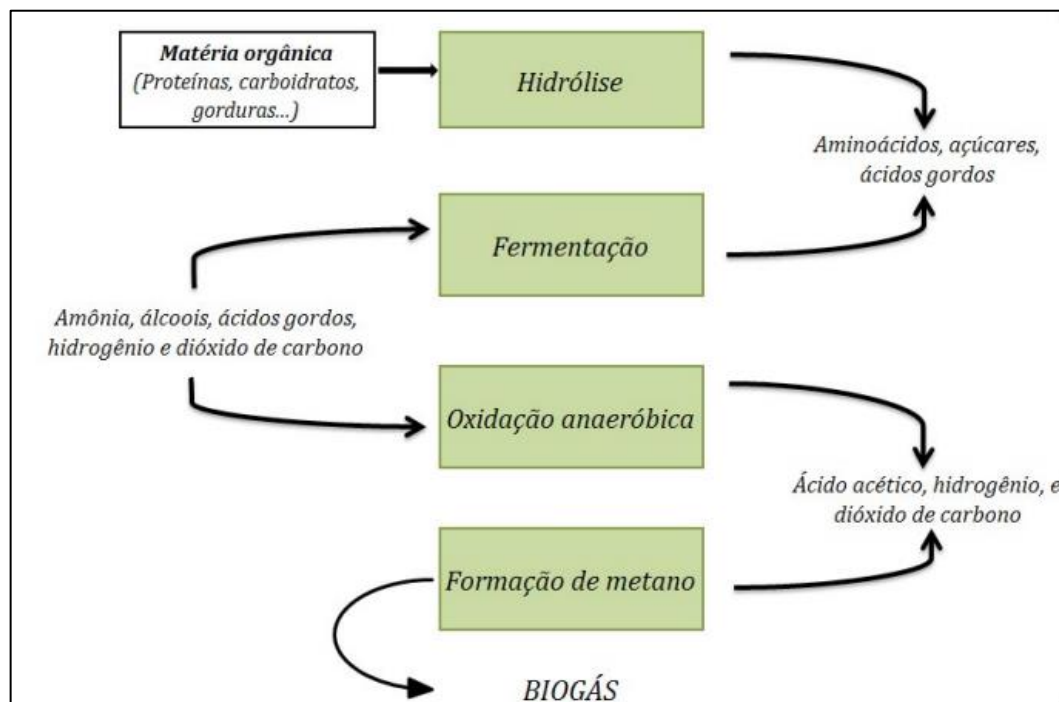
Após todas as etapas de purificação, o biogás resultante é considerado limpo e pode ser utilizado para a produção de energia elétrica, o aquecimento de ambientes entre outros. A purificação deste combustível permite a obtenção de um combustível renovável e de baixo impacto ambiental.

Para produzir o biogás a partir do bagaço de cana-de-açúcar, é necessário realizar um pré-tratamento deste último, que visa quebrar parcialmente e tornar instável a estrutura da lignocelulose, facilitando a próxima etapa, a digestão anaeróbia. O pré-tratamento pode envolver processos físico-químicos ou biológicos e, ainda, o uso de enzimas e fungos. Vale ressaltar que uma prática comum é a combinação de técnicas, originando um processo complexo.

Com o bagaço pré-tratado adequadamente, o processo avança para a etapa de digestão anaeróbia, que é a degradação da matéria orgânica por microrganismos anaeróbios (bactérias que se reproduzem em local de baixo potencial de oxirredução) resultando em biogás e digestato, que é a matéria sedimentada no biodigestor e pode ser utilizado como fertilizante, pois é rica em sais minerais e ainda possui matéria orgânica.

Durante as etapas da digestão anaeróbia - hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese - ocorre a formação espontânea de metano (CH_4), uma vez que o ambiente é livre de oxigênio. Durante esse processo, o dióxido de carbono (CO_2) gerado se liga à amônia (NH_3) e o enxofre forma o ácido sulfídrico (H_2S). Esse processo pode ser observado na Figura 2.1 abaixo.

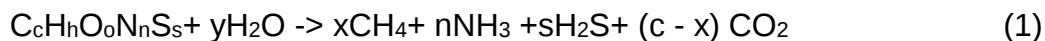
Figura 2.1 - Representação das etapas da digestão anaeróbia



Fonte: KARLSSON *et al*, 2014

Portanto, o biogás é composto principalmente por metano (55-70%) e dióxido de carbono (30-45%), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico, amônia, traços de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono, carboidratos e oxigênio. (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008)

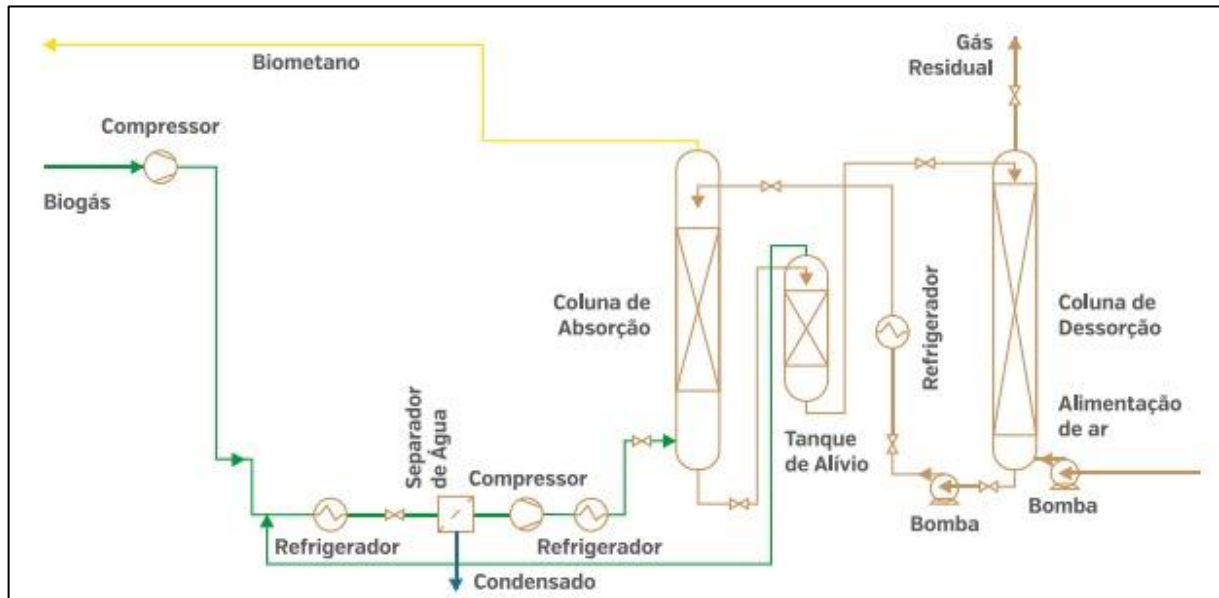
A formação do biogás a partir de biomassa segue a reação representada pela equação (1), na qual as letras minúsculas indicam os coeficientes estequiométricos envolvidos. (ARAÚJO,2017)



O biogás primário, que é o biogás obtido diretamente do biodigestor, é gerado em temperaturas entre 35°C e 55°C, no qual há participação de bactérias termófilas, e passa por dois processos sucessivos de condensação, utilizando um trocador de calor para gerar vapor, a fim de reduzir significativamente a quantidade de água presente no gás. Em seguida, o biogás é comprimido para reduzir o seu volume. Posteriormente, o biogás comprimido passa por um processo de purificação para remover o dióxido de carbono (CO₂) presente, utilizando uma das técnicas físico-químicas. (GRANDO,2021)

O biogás purificado, após passar pela etapa de absorção, é denominado biometano, contendo 90% ou mais de metano (CH₄). Da coluna de absorção, o biometano é liberado no topo e passa por um processo adicional de secagem para reduzir ainda mais a quantidade de água presente, a fim de ser utilizado como combustível sem danificar os motores em que foi empregado. Enquanto isso, a água (ou outro solvente utilizado) proveniente da coluna de absorção sai na base e é direcionada para uma nova coluna de dessorção, onde o dióxido de carbono e o metano residual são removidos, permitindo que a água seja reutilizada no processo de absorção do gás carbônico do biogás. (GRANDO, 2021). A Figura 2.1.1 apresenta o fluxograma de processos utilizando lavagem com água pressurizada e regeneração.

Figura 2.1.1 - Fluxograma do Processo de Produção do Biogás



Fonte: ISET, 2008

2.2 Equipamentos Industriais

A geração de biogás envolve o processo de fermentação da matéria orgânica por meio da digestão anaeróbica, ou seja, um processo que ocorre na ausência de oxigênio, resultando na liberação de metano (CH_4). Nesse sentido, o biodigestor desempenha um papel fundamental de acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica. Portanto, a escolha do equipamento industrial é crucial para atender às necessidades de produção.

Para isso, é essencial determinar o tipo de biodigestor a ser utilizado, levando em consideração o substrato a ser tratado, ou seja, o tipo de resíduo orgânico a ser utilizado. Além disso, a biomassa também desempenha um papel importante no processo de produção. É importante ressaltar que o investimento necessário e as condições ambientais também devem ser considerados para garantir a produção de um biogás de qualidade, de acordo com as especificações desejadas.

Desta maneira, abaixo pode-se observar quais as peculiaridades de cada equipamento do processo, bem como para que são utilizados.

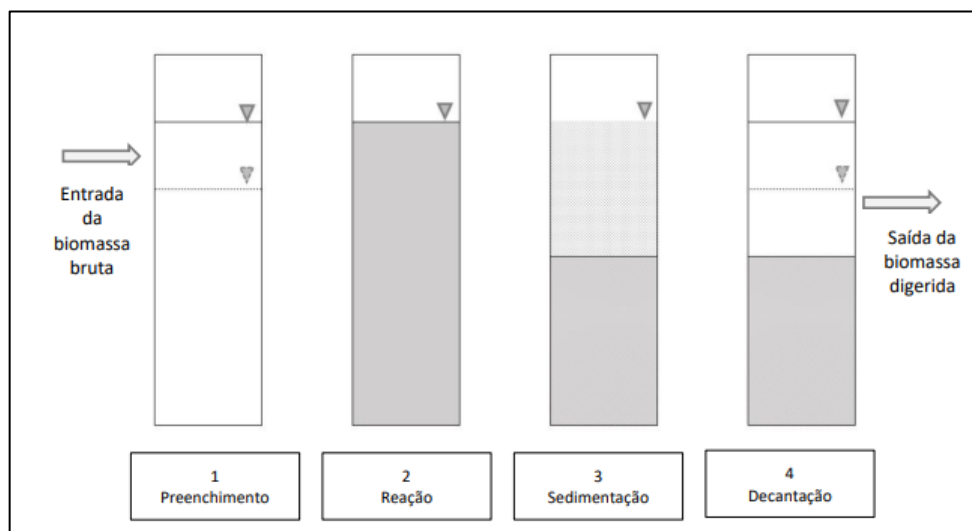
2.2.1 Biodigestores de fluxo hidráulico descontínuo

Neste tipo de biodigestor, o processo de fabricação ocorre em um reator em batelada ou descontínuo, conforme mostra a Figura 2.2.1. Por essa razão, o primeiro passo para iniciar a produção é determinar a quantidade de ciclos de operações, bem como a duração de cada um deles. É importante garantir que não haja variações nos tempos de cada ciclo, uma vez que a matéria orgânica permanece no reator durante todo o processo. Qualquer alteração nos períodos de processamento pode resultar em impurezas nos produtos obtidos em cada ciclo. (ZENATTI, 2019)

As etapas principais nesse tipo de produção de biogás são:

- Enchimento: é a alimentação inicial do reator durante o processo.
- Reação: também conhecida como Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), é definida no início do processo.
- Sedimentação: nesta etapa, ocorre a separação dos sólidos em suspensão do resíduo tratado.
- Esvaziamento: o resíduo tratado, ou efluente (parte líquida), é retirado.
- Repouso: ajustes para o processo são realizados nesse momento, especialmente para os ciclos. Além disso, o excesso de lodo é removido.

Figura 2.2.1 - Fases de operação de um reator em batelada



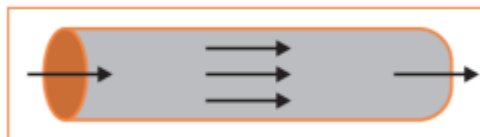
Fonte: MARTINEZ,2020

2.2.2 Biodigestores de fluxo hidráulico contínuo

Já nos biodigestores de fluxo hidráulico contínuo, a alimentação ocorre de forma contínua ou até mesmo semicontínua, ou seja, a cada vez que o processo é alimentado, uma quantidade equivalente de substrato é retirada. Dessa maneira, ao contrário do funcionamento em lotes, a produção de biogás é contínua, garantindo um fluxo uniforme ao longo do tempo.

Entre os equipamentos industriais deste tipo pode-se destacar o biodigestor de lagoa coberta (BLC) ou modelo canadense (tubular; de lona), o qual é um reservatório escavado no solo e revestido com um material geossintético, como PVC ou PEAD, que possui baixa permeabilidade a fluidos e gases, é flexível o suficiente para acumular o biogás gerado e apresenta um regime de alimentação semicontínuo, resultando em um fluxo que varia entre laminar e pistonado. Geralmente, é utilizado em áreas rurais para o tratamento de dejetos animais, pois possui facilidade de construção e operação. (REIS, 2020) É importante ressaltar que esse modelo de biodigestor requer um tempo de retenção hidráulica mais longo, o que implica em uma área de instalação maior. Além disso, a ausência de um sistema de aquecimento pode levar a variações de temperatura na biomassa, especialmente em regiões com invernos mais rigorosos, como a região Sul do Brasil, resultando em uma redução na geração de biogás.

Figura 2.2.2.1 – Biodigestor de fluxo contínuo



Fonte: KUNZ *et al*, 2019

Figura 2.2.2.2 – Biodigestor de fluxo contínuo



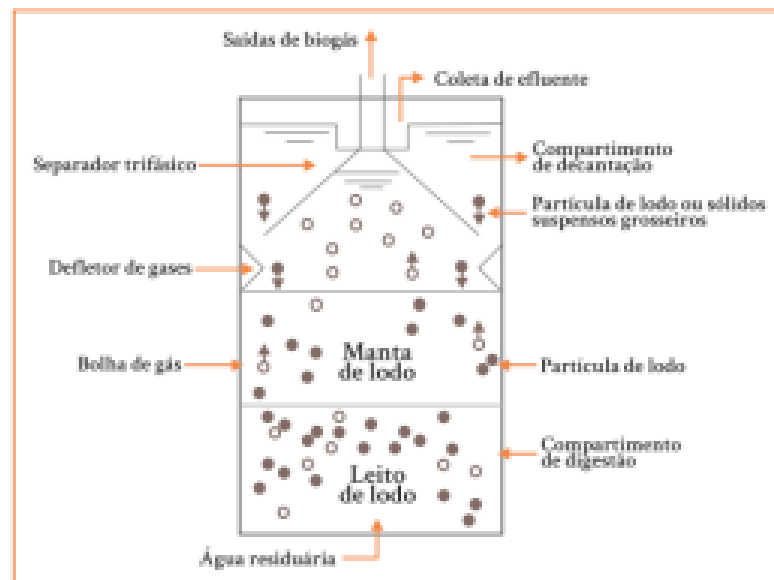
Fonte: KUNZ *et al*, 2019

Por causa do regime hidráulico do reator ou pela não utilização do sistema de remoção de sólidos, ocorre o acúmulo de lodo no fundo do tanque, o qual tende a ser maior, o que leva a necessidade de descartar esse material. Além do mais, o design do biodigestor acaba dificultando a remoção desses sólidos.

Por isso, esse modelo é usado para tratamento de efluentes com baixa concentração de sólidos (até 3% de sólidos totais) e com uma baixa carga orgânica volumétrica.

Já o biodigestor Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) é um modelo com elevada capacidade de retenção de biomassa, o que o admite trabalhar com um tempo baixo de retenção hidráulica (4h-72h). Consoante a isso, ele é estável a variações das características do afluente e suporta altas cargas orgânicas volumétricas, em especial quando submetido a uma matéria orgânica solubilizada. Além disso, esse biodigestor possui como característica o fluxo ascendente do afluente por uma manta de lodo que se estende até o topo do reator, onde existe um separador trifásico. Em questões hidrodinâmicas, o afluente do reator UASB apresenta-se com baixa concentração de sólidos totais ($<2\%$), demandando um pré-tratamento para a matéria orgânica de origem animal.

Figura 2.2.2.3 - Biogestor Upflow Anaerobic Sludge Blanket

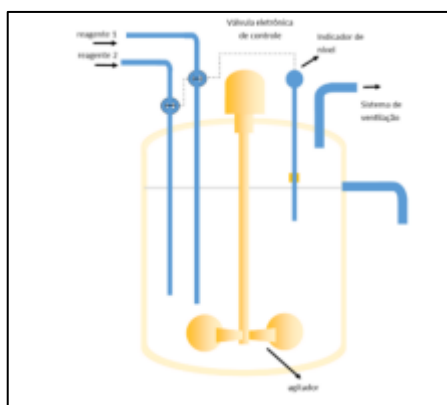


Fonte: KUNZ *et al*, 2019.

Há ainda modelos como biodigestor do tipo reator CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), que podem suportar cargas com grandes volumes, sendo a sua

característica principal o sistema de agitação o qual mantém o conteúdo em homogeneização. Ademais, deve-se salientar que outros parâmetros são controlados (temperatura, pH e nível de biomassa). Como é usado em plantas de biogás, essa configuração é a mais eficiente, pois executa a codigestão (mistura de substratos) e aceita a concentração mais elevada de sólidos. O tempo de retenção hidráulica e o tempo de retenção de sólidos diferenciam-se, uma vez que não há acúmulo de lodo no reator. O tempo de retenção hidráulica possui duração mínima de 15-30 dias, a depender do substrato a ser digerido.

Figura 2.2.2.4 - Biodigestor CSTR



Fonte: KUNZ *et al*, 2019

2.3 Fontes de Biomassa

Em resumo, a biomassa é composta por matéria orgânica derivada de colheitas agrícolas e florestais, produtos animais, massa de células microbianas, resíduos e produtos renováveis de base anual. (ZENATTI, 2019) Ela pode ser obtida a partir de qualquer massa biológica, seja de origem vegetal ou animal e é a principal fonte de energia para a produção de diversos biocombustíveis, como bio-óleo, biodiesel, BTL (Biomass To Liquid), etanol e biogás. Este último é uma das principais formas de aproveitamento da biomassa, sendo considerado uma alternativa de energia limpa. Uma característica importante da biomassa é que ela se renova em curtos períodos, tornando-a um recurso renovável fazendo com que isso a diferencie das fontes de energia fósseis, como o carvão mineral e o petróleo. A vinhaça é o tipo de biomassa mais conhecido para a produção de biogás, no entanto, existem várias outras opções de substratos disponíveis, conforme apresentado na Tabela 2.3 abaixo.

Tabela 2.3 – Fontes de Biomassa

Tipo Vegetal	Tipo Animal
Papéis e jornais	Fezes de suínos
Sobras de comida	Fezes de aves
Soro de queijo	Fezes de bovinos
Resíduos de grão	Resíduos de abatedouro
Capim e algas	Fezes de coelho
Resíduos de Cervejaria	Esgoto
Lixo urbano	-

Fonte: ZENATTI, 2019

É importante destacar, que a biomassa de origem animal é bastante comum na área rural, e dessa forma, torna-se mais vantajosa para geração de biogás nessa área, por ser uma alternativa para o descarte de dejetos de animais. Já a biomassa advinda de algas, permite não apenas a produção de biogás, mas também a fabricação de álcool anidro e hidratado, bioetanol, entre outros.

2.4 Tratamento do biogás

Para gerar biogás em uma usina utiliza-se o método Water Scrubbing (WS), no qual utiliza-se a água pressurizada como absorvente, sendo esta pulverizada em sentido contrário ao biogás (que entra em sentido ascendente da base de uma coluna de absorção).

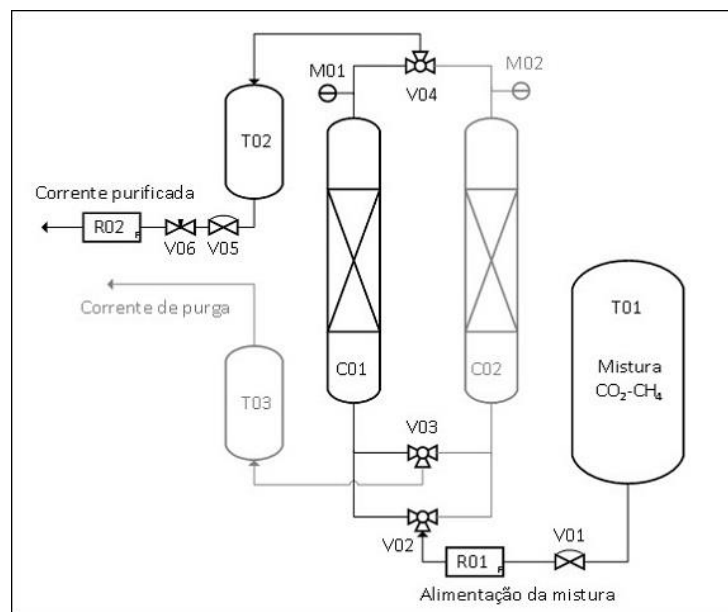
Todavia, para obtenção do biometano, há outras maneiras de tratar o biogás como a técnica de Pressure Swing (PSA), a separação por tecnologia criogênica, e a separação por membrana e purificação biológica.

O método de separação PSA consiste em usar materiais altamente porosos com elevada seletividade para reter certos componentes e permitir a passagem de outros. Os adsorventes mais utilizados são carvões ativados, adsorventes poliméricos e zeólitas naturais ou sintéticas. O agente adsorvente é colocado no leito de uma coluna de adsorção, onde o biogás pressurizado entra em contato com a superfície do material. Nesse processo, o dióxido de carbono é retido e, após um determinado período, a coluna fica saturada de dióxido de carbono e é necessário realizar a despressurização ou aumentar a temperatura para torná-la apta a purificar o biogás. (ANDRIANI *et al*, 2013)

No sistema de adsorção por variação de pressão, as colunas verticais carregadas com adsorventes são utilizadas e o processo ocorre através de etapas

sequenciais de adsorção, despressurização, dessorção e pressurização. Na coluna de adsorção, o dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2) ficam retidos, resultando em um gás de saída com mais de 97% de metano (CH_4). Antes que a coluna esteja completamente saturada com impurezas, a fase de adsorção é interrompida e passa-se para a próxima coluna, que já deve ter sido regenerada, para manter o processo contínuo. A regeneração das colunas de adsorção é realizada pela despressurização até a pressão atmosférica e, em seguida, próxima ao vácuo. Dessa forma, o gás liberado pelas colunas de adsorção contém uma alta quantidade de metano (CH_4) e é reciclado, voltando para a purificação do biogás. Antes de retornar à fase de adsorção, cada coluna é pressurizada novamente até a pressão de adsorção. (MANERA *et al*, 2017)

Figura 2.4 – Adsorção por variação de pressão



Fonte: MANERA *et al*, 2017

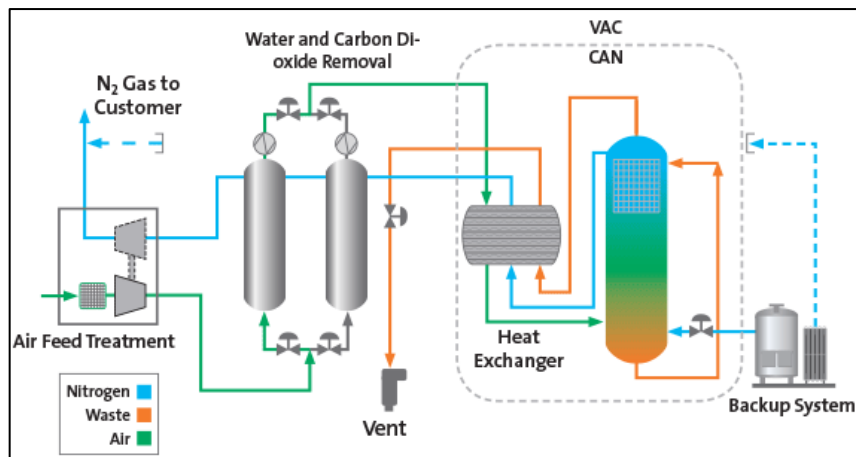
Já na separação por tecnologia criogênica (figura 2.4.1), utiliza-se o método de purificação de gás por meio da condensação e destilação fracionada dos seus constituintes, em temperaturas extremamente baixas.

Nesse processo, o metano (CH_4) é separado do dióxido de carbono (CO_2) em uma coluna de destilação, operando em temperaturas abaixo do zero. O biogás bruto passa por compressores e trocadores de calor, entrando na coluna sob altas pressões e baixíssimas temperaturas, respeitando as condições operacionais do processo. Como resultado, o metano de alta pureza é vaporizado e sai pelo topo da coluna,

enquanto o dióxido de carbono é removido em estado líquido pelo fundo da coluna. (YOUSEF *et al.*, 2016)

Embora essa técnica ofereça a vantagem de obter o dióxido de carbono na forma líquida, facilitando a sua recuperação, ela apresenta algumas desvantagens, como o alto custo de investimento e a baixa eficiência térmica, devido à variação de fluxo.

Figura 2.4.1 – Separação por tecnologia criogênica

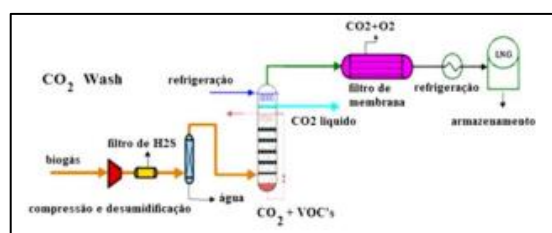


Fonte: Air Products, 2023

Na separação por membrana (ou CO₂ Wash), o gás metano é submetido a um pré-tratamento para remover água e sulfeto de hidrogênio e, em seguida, comprimido a altas pressões para entrar em contato com as membranas, que podem consistir em um ou até três estágios. Essas membranas são feitas de materiais altamente permeáveis ao dióxido de carbono e à água, permitindo a passagem desses componentes e retraindo o metano. (BASU *et al.*, 2010)

Portanto, as etapas envolvidas no processo são a compressão e o pré-tratamento, a purificação do biogás, a liquefação e o armazenamento do biometano, como ilustrado na Figura 2.4.2.

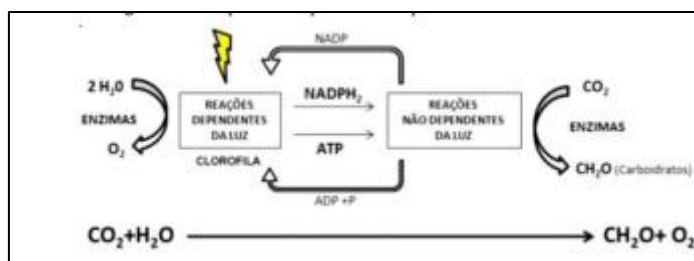
Figura 2.4.2 – Separação por membrana



Fonte: ZENATTI, 2019

Por fim, o método de separação biológica (como mostra a Figura 2.4.3) ainda está sendo testado em plantas e micro-organismos fotossintéticos, como microalgas e algumas espécies de cianobactérias. Nele, a célula utiliza a energia solar para oxidar a água, produzindo oxigênio e reduzindo o CO_2 . Nos estudos realizados, foram obtidas concentrações de 80-85% de metano no gás de saída, indicando o potencial dessa técnica. (ANDRIATTA, 2021)

Figura 2.4.3 – Separação Biológica



Fonte: ZENATTI, 2019

2.5 O modelo termodinâmico

A escolha do modelo termodinâmico é uma etapa fundamental para a simulação de processos industriais. Logo, há uma grande variedade de pacotes termodinâmicos para atender tais condições e adequá-las a um sistema específico. (PARANHOS, 2014)

O pacote termodinâmico pode ser escolhido de maneira mais sofisticada, sendo que o simulador abrange cálculos mais precisos e economiza tempo e trabalho. Nesses casos o investimento é alto, mas os resultados obtidos, geralmente, são mais precisos. Há como adotar, também, métodos de simulações que são mais limitados, considerando os equilíbrios líquido-vapor do sistema e adotando as equações de estado de maneira ideal, fator que proporciona a imprecisão. Na maioria dos casos, a diferença de produtividade entre as escolhas é pequena sendo então fácil usar métodos e simuladores mais “comuns” desde que se adequem as condições operacionais. (SUPPES & YAN, 2009).

Os modelos termodinâmicos que, usualmente, são encontrados nos ambientes de simulação estão apresentados na Tabela 2.5.1 abaixo. (SMITH *et al*, 2019)

Tabela 2.5.1. Modelos Termodinâmicos

Modelo Termodinâmico	Características
PENG ROBINSON	Utilizado para sistemas de Líquido-Vapor ou que envolvam hidrocarbonetos.
LEE KESLER PLOCKER	Utilizado para sistemas com misturas não polares, também é aplicado para sistemas com hidrocarbonetos leves e que envolvam hidrogênio.
SOAVE REDLINCH KWONG	Semelhante ao modelo de Peng-Robinson, porém mais limitado. Aplicável a sistemas de refino e que envolvam fases gasosas.
NRTL	Utilizado nos equilíbrios químicos de Vapor-Líquido e Líquido-Líquido e, bastante aplicável em sistemas não ideais.
UNIQUAC	Utilizado nos equilíbrios químicos de Vapor-Líquido e Líquido-Líquido e, bastante aplicável em sistemas não ideais.
WILSON	Aplicável a sistemas não ideais. Mas com fuga da idealidade pequena.
IDEAL	Aplicável a sistemas ideais, com condições de pressão e temperatura atmosféricas e correntes de entrada com componentes semelhantes.

Fonte: Adaptado de SMITH *et al*, 2019

Com a evolução científica, os modelos foram alterados para atender a um Range maior de condições, surgindo assim, por exemplo, os modelos de Peng - Robinson e Soave Redlich Kwong modificados, que atendem a sistemas não ideais. A aplicabilidade dos modelos pode ser vista na Tabela 2.5.2.

Tabela 2.5.2 - Aplicabilidade dos modelos termodinâmicos

Categoria do Modelo	Pacotes termodinâmicos indicados	Tipo de Sistema	Exemplo
Equação de Estado (EOS)	SRK Peng Robinson	Gás ideal + Líquido ideal	Componentes do Petróleo. Hidrocarbonetos similares. Gases Leves.
Parâmetros de Interação Binário (BIP) com coeficiente de atividade	NRTL WILSON	Gás ideal + Líquido Polar	Água + Orgânicos. Ácido minerais + água. Hidrocarbonetos
Atividade Preditiva	UNIFAC UNIQUAC	Gás ideal + Líquido Polar	Água + Orgânicos. Ácido minerais + água. Hidrocarbonetos
Eletrolítica	NRTL	Solução eletrolítica	Água + Ácido/Base-Sal

Fonte: HILL & JUSTICE, 2011

Nas bases de dados do DWSIM, o software de simulação usado no presente trabalho, há orientações, também, de quais são os modelos termodinâmicos mais indicados para condições físico-químicas pré-estabelecidas, conforme mostra a Tabela 2.5.3.

Tabela 2.5.3 - Aplicabilidade orientada para o DWSIM

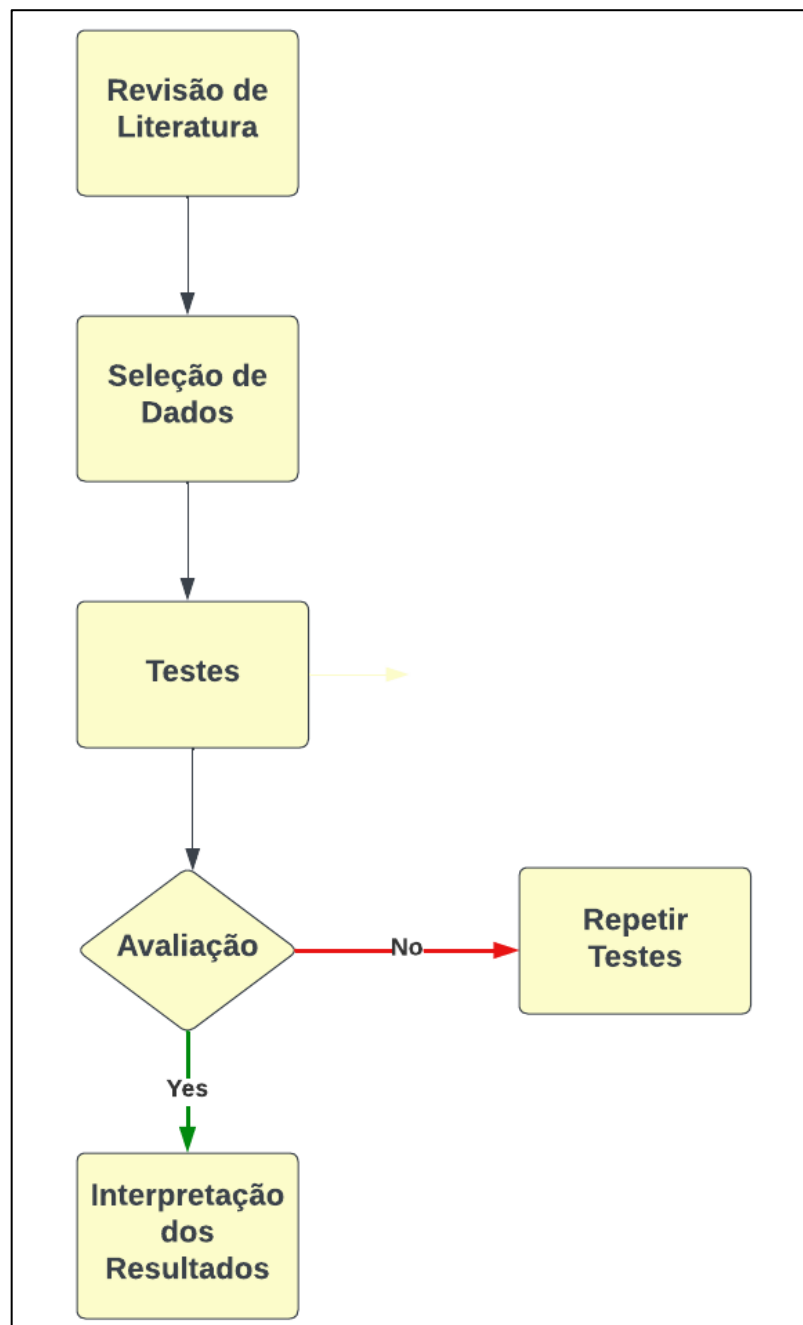
Sistema	Pressão do Sistema	Indicação de Pacote Termodinâmico
Gases Não Polares	Inferior a 10 atm (baixa pressão)	Pacote Termodinâmico com a Lei de Raoult
Gases Não Polares	Superior a 10 atm (alta pressão)	Peng Robinson e Soave Redlich Kwong
Gases Polares	Superior a 10 atm (alta pressão)	Peng Robinson e Soave Redlich Kwong
Sistemas com bastante Hidrogênio	-	Lee Kesler Plocker
Componentes Polares	-	NRTL, UNIQUAC e UNIFAC

Fonte: Adaptado de DWSIM, 2023

3 METODOLOGIA

As seguintes etapas (figura 3.1) foram desenvolvidas respectivamente no trabalho: revisão ampla na literatura científica a fim de encontrar dados para simulação e referências para validar e comparar a simulação, a seleção de dados (fração molar, pressão e vazão de água), os testes iniciais (fase 1), a avaliação e interpretação dos dados gerados.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos das fases experimentais do estudo

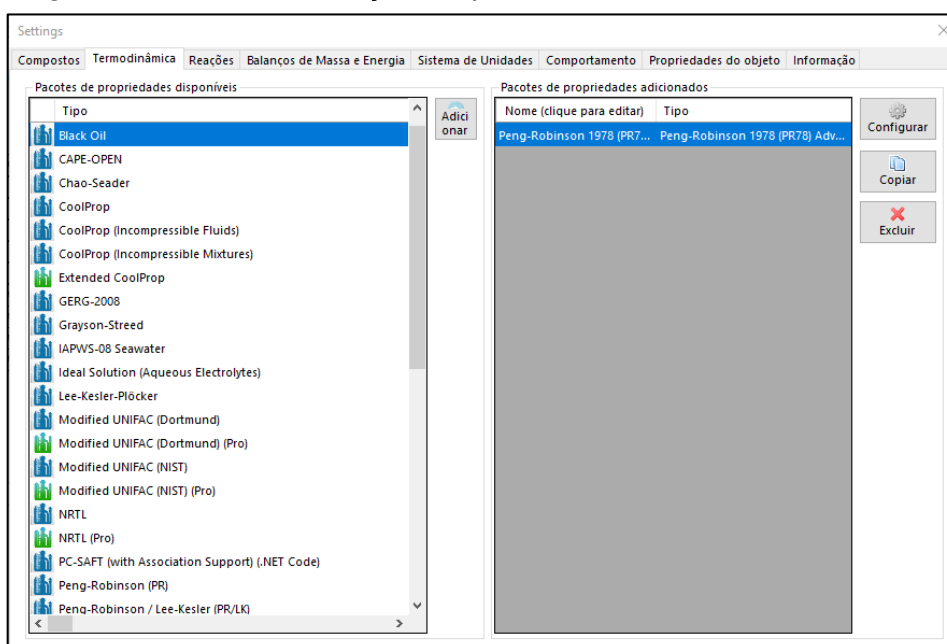


Para a realização da simulação um passo importante é a escolha do modelo termodinâmico adequado, que foi orientada pela natureza dos componentes (do biogás) e condições do processo. O biogás bruto é uma mistura de gases, nos quais o dióxido de carbono e metano (objetos de estudo do experimento) são os gases em maiores proporções. É importante mencionar que o tratamento do gás é realizado removendo os contaminantes (remoção de dióxido de carbono) e aumento da concentração do metano no gás e que a composição é um dos indicadores do modelo termodinâmico a ser adotado.

Outro fator, que deve ser levado em consideração é a solubilidade baixa do dióxido de carbono em água, indicando que o sistema deve trabalhar sob altas pressões (acima de 10 atm), pois a concentração de um gás dissolvido em um líquido é proporcional à pressão parcial do gás. Logo, a quantidade de gás dissolvida em um líquido pode ser aumentada pelo aumento da pressão do gás.

Assim, analisando a composição química do biogás e as condições de operação do processo de absorção, o pacote termodinâmico adotado no trabalho foi Peng-Robinson avançado. Vale ressaltar, que de acordo com o manual do DWSIM v.8.6.5, as equações de estado nele contido são indicados para sistemas de gases não polares sob altas pressões ($p > 10$ atm) com uma abrangência maior que o modelo Peng-Robinson convencional. A tela da seleção do pacote termodinâmico do DWSIM com vários modelos termodinâmicos é apresentada na figura 3.2.

Figura 3.2 - Tela de seleção do pacote termodinâmico no DWSIM



Fonte: O Autor, 2023

Antes de realizar os estudos dos perfis e a simulação foi necessário verificar se o DWSIM é um software viável para esse processo, dessa maneira foi usado o trabalho do NETO & GÓIS (2022) como referência, pois o autor estuda a purificação do biogás com colunas de absorção utilizando água, logo como o processo é o mesmo foram utilizados os mesmos dados de entrada, composição e natureza do biogás e o mesmo modelo termodinâmico e dados para coluna de absorção, com o objetivo de validar a simulação no DWSIM (Apêndice A).

Para o presente estudo, foram selecionados dados para a composição do biogás e para a corrente de entrada que estão dentro da faixa da composição normal de um biogás da agroindústria, e próximos aos trabalhos referências. Como já foi realizado a validação, os dados de entrada serão diferentes além do modelo termodinâmico, para no final comparar se o biogás obtido é semelhante, inferior ou superior aos das referências. Os dados de composição do biogás escolhido, que é a base e o ponto de partida dessa experiência, e as referências dos estudos de SECHI (2019), AGENA *et al* (2020) e NETO & GÓIS (2022) estão apresentados na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Composição do Biogás Bruto

Componente Químico	Composição para simulações (%mol/mol)	Composição (%mol/mol) SECHI (2019)	Composição (%mol/mol) AGENA <i>et al</i> (2020)	Composição (%mol/mol) NETO & GÓIS (2022)
CH ₄	65	60	60	60
CO ₂	32,55	37,9	39,5	38,9
N ₂	0,5	0,5	-	0,5
O ₂	0,1	0,5	-	0,5
H ₂ S	0,002	0,0004	0,006	0,0003

Fonte: O Autor, 2023

As variáveis de entrada do biogás bruto foram baseadas nas mesmas referências, no entanto, para efeitos de estudos, variou-se a vazão de alimentação para observar o comportamento dos perfis. (Tabela 3.2)

Tabela 3.2 – Dados do Biogás Bruto.

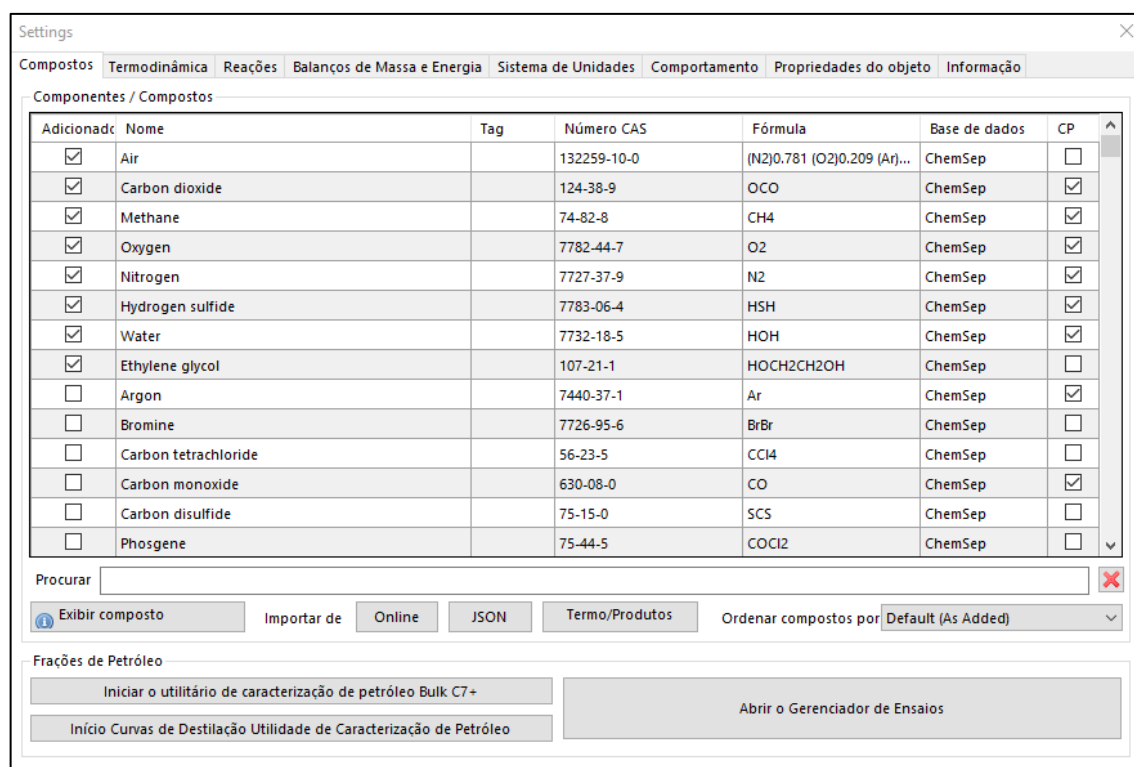
Entrada de Processo	Valor	SECHI (2019)
Vazão de Biogás bruto (kg/h)	1011	604,5
Temperatura do Biogás Bruto (°C)	25	25
Pressão do Biogás (atm)	1	1

Fonte: O Autor, 2023

A seleção dos componentes (figura 3.3) foi realizada antes do ambiente de simulação. Logo após a escolha do pacote termodinâmico foram selecionados os parâmetros de operação do processo. (figura 3.4)

A água também foi selecionada pois ela é o fluido que irá absorver os contaminantes do gás. Outro componente adicionado foi o ar porque o consumo de água é alto. Em seguida, foi realizada a regeneração da água para reaproveitá-la no processo (colunas de esgotamento).

Figura 3.3 - Seleção dos componentes



Fonte: O Autor, 2023

Figura 3.4 - Parâmetros de entrada no sistema

Informações Gerais		
Objeto	Biogás Bruto	
Estado	Calculado (29/11/2023 10:32:28)	
Vinculado a		

Property Package Settings		
Pacote de propriedades	Peng-Robinson 1978 (PR78) Advanced (2)	

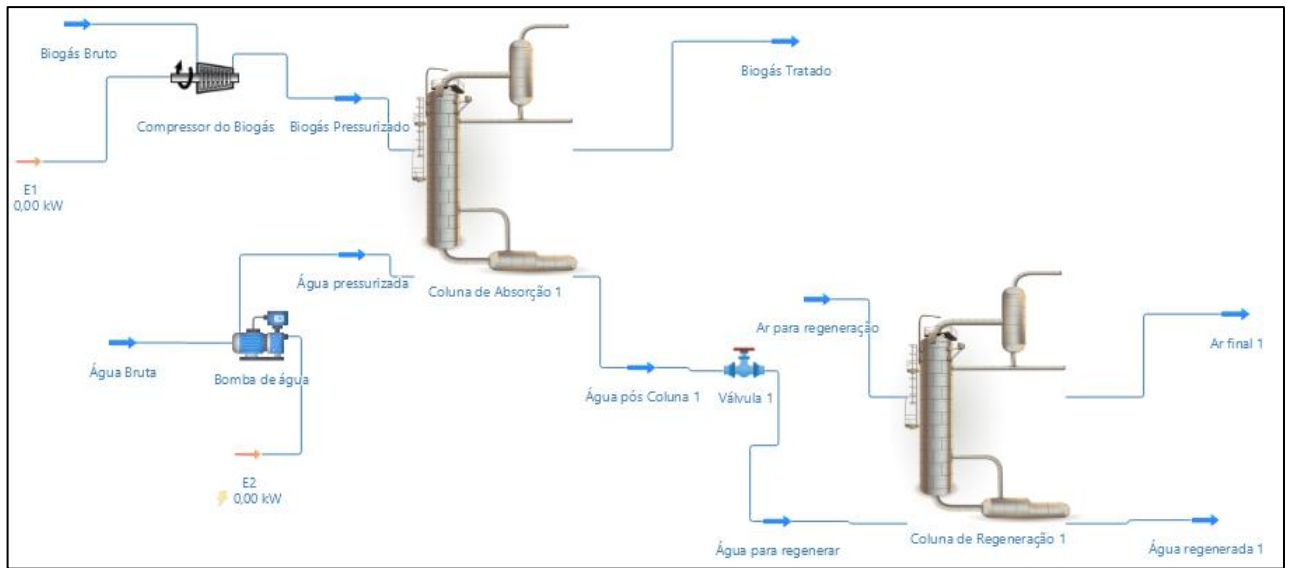
Dados de entrada		
Resultados Anotações Dinâmica Tabelas flutuantes		

Condições do fluxo		
Quantidades Compostas		
Especificações do Flash	Temperature and Pressure (TP)	
Temperatura	25	C
Pressão	1,033	kgf/cm2
Fluxo de Massa	1011	kg/h
Fluxo Molar	23099,5	m3/d @ BR
Fluxo Volumétrico	975,925	m3/h
Entalpia específica	-0,97074	kJ/kg
Entropia Específica	0,255881	kJ/[kg.K]
Fração Mole de Fase de Vapor	1	

Fonte: O Autor, 2023

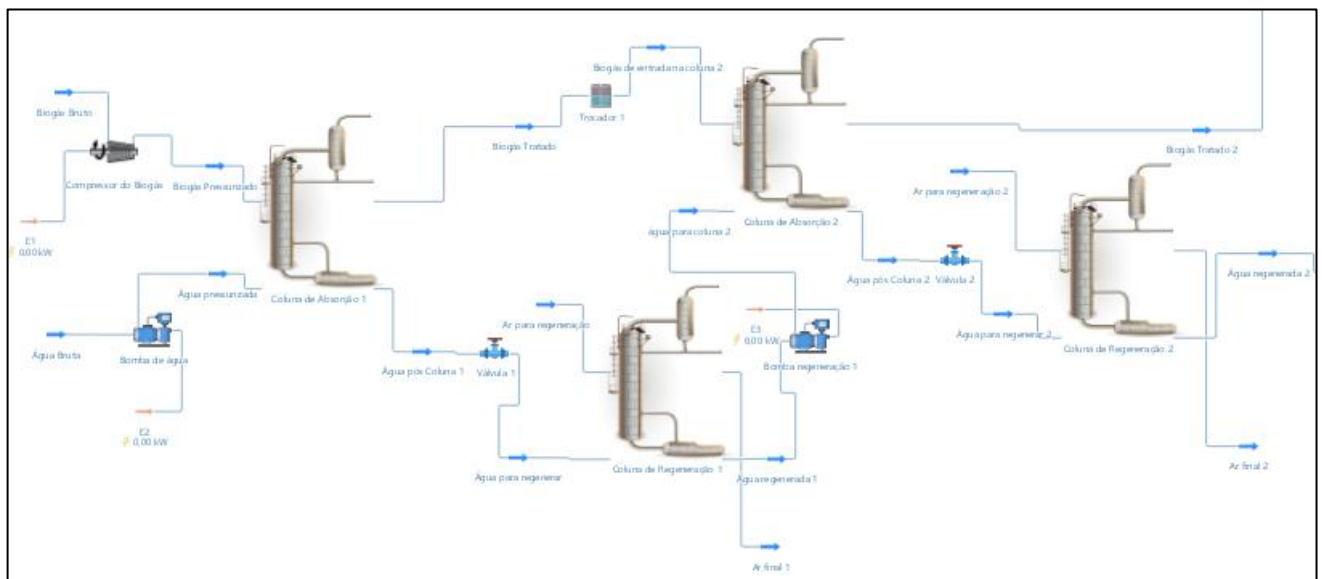
O arranjo escolhido para o processo considerou três associações de equipamentos em conjunto com uma, duas ou três colunas de absorção/esgotamento. (figuras 3.5, 3.6 e 3.7) Em todas as situações estudadas foi necessário o uso de um compressor para que a pressão do biogás na entrada da coluna estivesse de acordo com a especificação. Também foi necessário o uso de bombas.

Figura 3.5 – Sistema com uma coluna



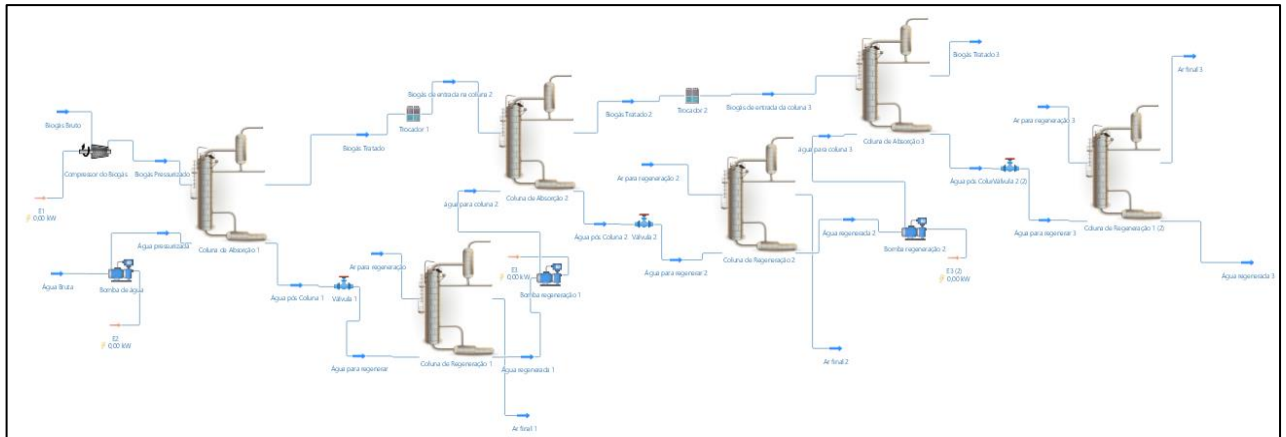
Fonte: O Autor, 2023

Figura 3.6 – Sistema com duas colunas



Fonte: O Autor, 2023

Figura 3.7 – Sistema com três colunas



Fonte: O Autor, 2023

Para a realização adequada da simulação, foi utilizada a extensão CHEMSEP versão 8.40, que é um simulador para as operações unitárias que trabalham com colunas, como a destilação, absorção e extração líquido- líquido. O acesso ao CHEMSEP é realizado pela seleção do editor CAPE-OPEN, no qual é possível escolher os componentes da simulação como o número de pratos, visualizar as correntes de entrada e saída bem como selecionar os modelos de estado e adotar o pacote termodinâmico desejado. A interface do simulador pode ser observada nas figuras 3.8 e 3.9.

Figura 3.8 - Aba para seleção dos dados do CHEMSEP

Coluna de Absorção 1 (CAPE-OPEN Unit Operation) 🔍

General Info

Objeto

Estado Calculado (29/11/2023 10:32:39) ✓

CAPE-OPEN

Nome ChemSep Column / Flash

Descrição ChemSep CAPE-OPEN Unit Operation

Object / CAPE-OPEN Version 2.0.0.10 / 1.0

Editor

Open CAPE-OPEN Object Editor

Connections

Inlet Outlet Energia

Nome	Riacho			
Feed2_stage12	Biogás de entrada na coluna 1	▼	C	D
Feed1_stage1	Água pressurizada	▼	C	D

Fonte: O Autor, 2023

Figura 3.9 - Aba de simulação de colunas no CHEMSEP

Stream	Feed1	Feed2	Top	Bottom
Stage	1	5	1	5
Pressure (N/m ²)	5.0662E+06	5.0662E+06	5.0662E+06	5.0662E+06
Vapour fraction (-)	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000
Temperature (K)	298.579	298.150	298.564	298.519
Enthalpy (J/kmol)	-2.874E+08	-1.778E+08	-7.678E+07	-2.874E+08
Entropy (J/kmol/K)	65648.4	165324	152703	65737.7
Total molar flow (kmol/s)	5.32809	0.0108783	0.00722567	5.33174
Total mass flow (kg/s)	95.9855	0.272482	0.116726	96.1413
Vapour std.vol.flow (m ³ /s)		0.257707	0.171175	
Liquid std.vol.flow (m ³ /s)	0.0962302			0.0964247
Mole flows (kmol/s)				
Air	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Carbon dioxide	0.000000	0.00354088	8.0605E-05	0.00346028
Methane	0.000000	0.00707088	0.00691198	1.5889E-04
Oxygen	0.000000	1.0878E-05	1.0139E-05	7.3847E-07
Nitrogen	0.000000	5.4391E-05	5.4224E-05	1.6636E-07
Hydrogen sulfide	0.000000	2.1756E-05	1.7658E-10	2.1756E-05
Water	5.32809	0.000000	7.0585E-06	5.32808
Ammonia	0.000000	1.6317E-05	3.1886E-17	1.6317E-05
Hydrogen	0.000000	1.6317E-04	1.6166E-04	1.5123E-06
Mole fractions (-)				
Air	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Carbon dioxide	0.000000	0.325500	0.0111555	6.4899E-04
Methane	0.000000	0.650000	0.956587	2.9801E-05
Oxygen	0.000000	0.00100000	0.00140330	1.3850E-07
Nitrogen	0.000000	0.00499999	0.00750448	3.1203E-08

Fonte: O Autor, 2023

A simulação foi realizada segundo três cenários, conforme descrito abaixo:

1. Primeiro cenário: Simulação de um sistema a fim de encontrar o comportamento e o ponto ótimo do número de pratos teóricos nas colunas em relação a composição do biogás. É importante destacar que foi considerado o mesmo número de estágios nos equipamentos de operação.

2. Segundo cenário: Simulação com os dados do número de estágios teóricos obtidos anteriormente, e a temperatura do biogás. Nessa etapa foi realizada a simulação do comportamento do processo, com o objetivo de verificar o perfil das composições de saída do biogás em função da vazão de entrada do absorvente (no caso, a água).

3. Terceiro cenário: a simulação foi realizada com a finalidade de avaliar a vazão dos componentes em função da pressão da coluna de absorção.

Após as três simulações foram comparados os perfis gerados, com dados de referência da literatura científica. Desse modo, foram adotadas situações “ótimas” para os processos avaliados com uma, duas ou três colunas em séries. Com isso, o número de equipamentos foi um parâmetro fundamental para estimar o custo do processo uma vez que quanto maior o número de equipamentos, maior o investimento

em OPEX (que é uma medida de custos operacionais, na indústria). Assim, a contabilização dos equipamentos de cada esquema é observada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Quantidade de Equipamentos

Equipamentos	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Compressor	1	1	1
Bombas de Água	1	2	3
Cooler de ar	0	1	1
Colunas de Absorção	1	2	3
Colunas de Regeneração	1	2	3

Fonte: O Autor, 2023

Assim, visando encontrar as condições ótimas do processo, foram realizadas as simulações para otimizar a pressão do sistema, a vazão de água mínima necessária e o número de estágios teóricos. É importante destacar que os parâmetros mencionados foram otimizados, tendo como meta atingir valores acima de 97% de fração de metano como resultado do composto tratado (aumentar a concentração de metano).

Por fim, comparou-se os trabalhos obtidos com os trabalhos de referência e, contabilizou-se o custo energético dos equipamentos envolvidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações foram realizadas individualmente, e os resultados obtidos foram comparados com a literatura científica de referência. Os principais autores de referência são: SECHI (2019), AGENA *et al* (2020) e NETO & GÓIS (2022).

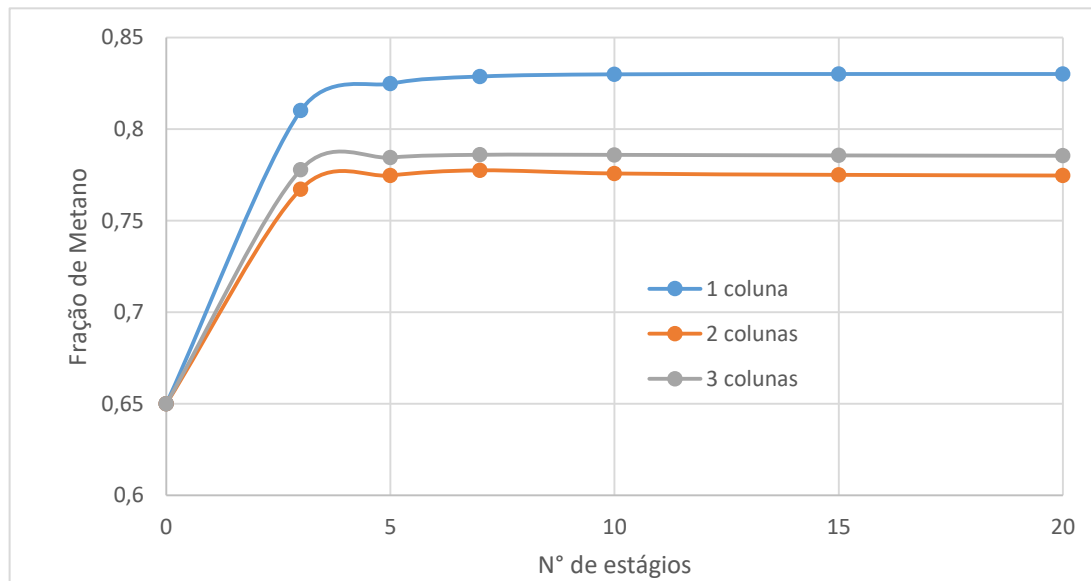
Considerando as características do biogás, mistura gasosa de gases apolares e com baixa solubilidade em água o modelo termodinâmico escolhido foi o de Peng Robinson avançado. Para a simulação do primeiro cenário foram considerados dados de entrada e do processo, tais como, temperatura do biogás, vazão de água e pressão, conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores iniciais de simulação para número de estágios

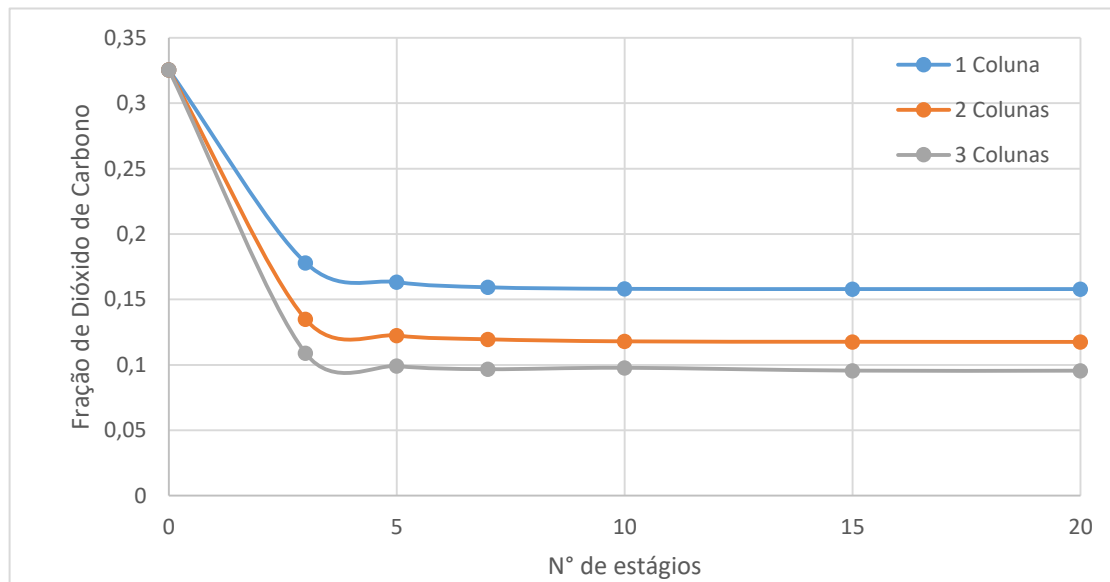
Parâmetro de Operação	Valores Iniciais
Temperatura do Biogás (°C)	25
Vazão de água (kg/h)	3033
Pressão nas colunas (atm)	10

Fonte: O Autor, 2023

O objetivo dessa primeira etapa foi determinar o número mínimo de estágios teóricos para os sistemas com uma, duas e três colunas. Para o esquema com uma, duas e três colunas de absorção foram obtidas as frações molares das espécies químicas CH₄, CO₂ e H₂O versus número de pratos teóricos para cada associação de equipamentos (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3).

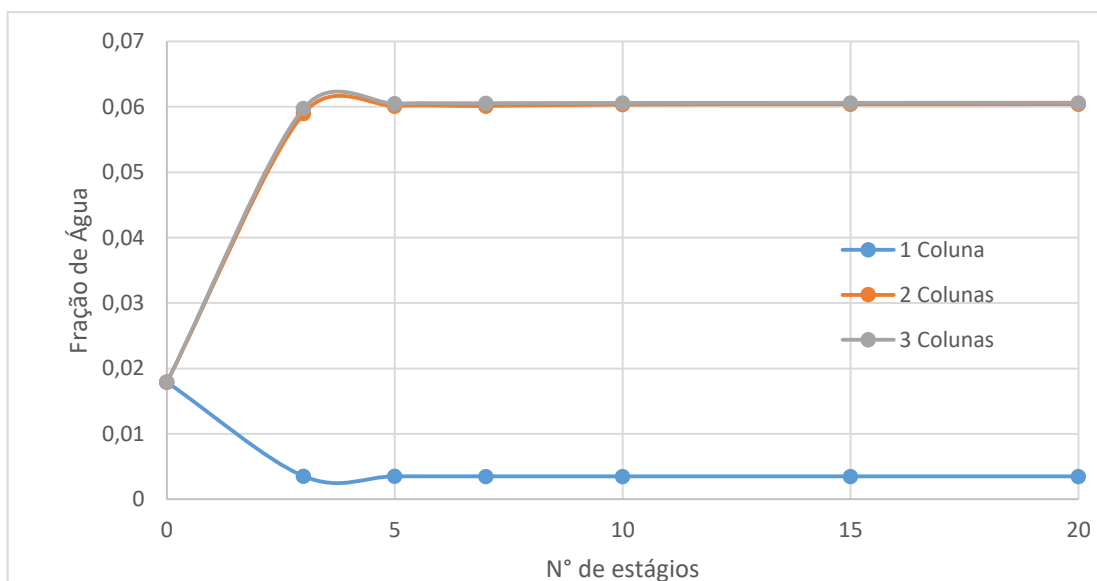
Figura 4.1 – Fração Molar de CH_4 versus Número de Estágios Teóricos

Fonte: O Autor, 2023

Figura 4.2 - Fração Molar de CO_2 versus Número de Estágios Teóricos

Fonte: O Autor, 2023

Figura 4.3 - Fração Molar de H₂O versus Número de Estágios Teóricos

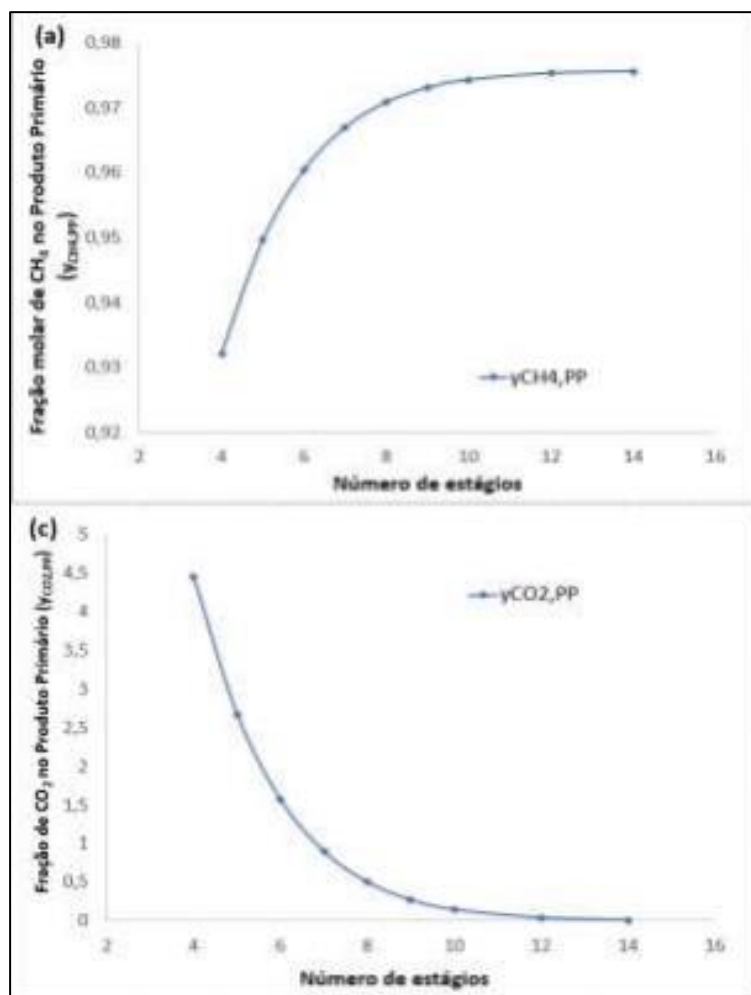


Fonte: O Autor, 2023

De acordo, com as figuras 4.1, 4.2 e 4.3 é possível perceber que em ambos os sistemas (1, 2 e 3 colunas) a coluna de absorção irá necessitar de cinco estágios teóricos para o tratamento do biogás, e que após os cinco estágios as frações das espécies químicas, CH₄, CO₂ e H₂O se tornam constantes. Portanto, não é possível melhorar a eficiência do processo com o aumento do número de estágios teóricos, sendo esse o limite máximo de recuperação da coluna. Outro ponto de grande relevância é que não foi possível obter frações de metano superior a 85 %, e sabe-se que quanto maior a porcentagem de metano, maior é o poder energético do biogás.

Além disso, observa-se que à medida que se adicionam mais colunas no arranjo, a fração molar de água no tratado aumenta, sugerindo a vaporização dela, e consequentemente a redução da concentração de metano no gás tratado. Para comparar o comportamento dos resultados obtidos com dados da literatura o trabalho de SECCHI (2019) foi usado como referência o autor fez a simulação utilizando o software de simulação iiSe. Os perfis obtidos no trabalho do autor estão apresentados na figura 4.4.

Figura 4.4 – Frações de purificação de Biogás em trabalho de comparação



Fonte: SECCHI, 2019

Comparando os perfis obtidos no trabalho de SECCHI (2019), pressupõe-se uma similaridade com o presente estudo, pois nota-se a mesma tendência de comportamento dos resultados. Logo, pode-se inferir que o comportamento da curva é próximo, no entanto, o número de estágios encontrados é diferente. Isso pode ser explicado pelas diferentes vazões mássicas de entrada, pressão da coluna e vazão de água de entrada; também é importante ressaltar que o autor conseguiu obter 98% de metano, concentração superior ao obtido na simulação anterior utilizando o DWSIM.

Desse modo, considerando o perfil obtido em cada simulação, fixou-se o número de estágios teóricos para as etapas posteriores em doze, pois tanto na simulação anterior, quanto no trabalho de SECCHI (2019) as frações na saída da CH_4 e CO_2 já se encontravam constantes com essa quantidade de estágio. Outro ponto

interessante é manter um valor fixo (número de estágios) para verificar a influência de outras variáveis na absorção.

A próxima etapa é o estudo do segundo cenário proposto, nesse caso as simulações foram realizadas para avaliar a purificação do biogás, em relação a vazão de água de entrada nas colunas. Os dados para essa segunda simulação podem ser observados na tabela 4.2.

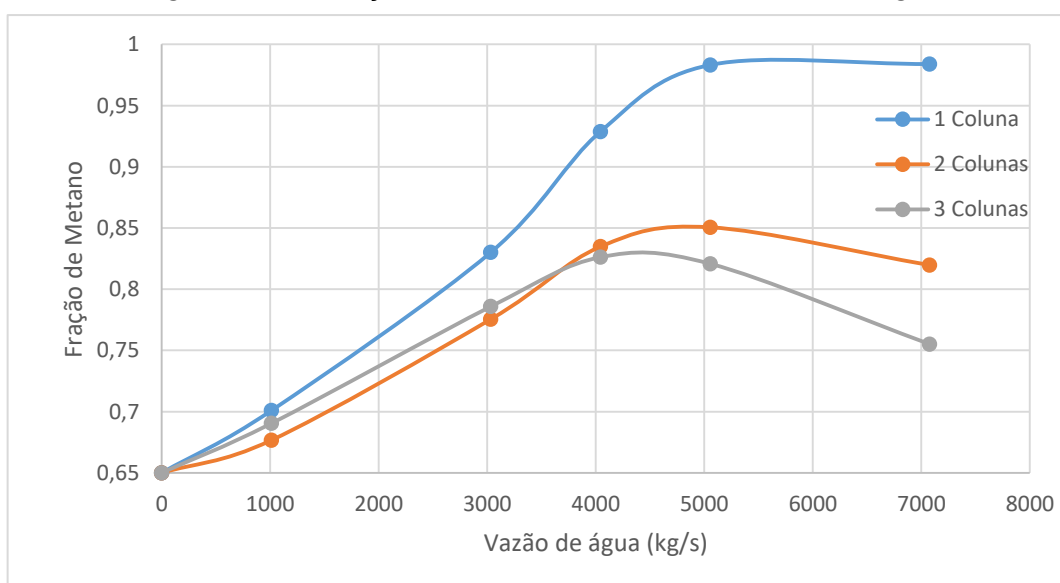
Tabela 4.2 - Valores iniciais de simulação para vazão de água

Parametron de Operação	Valores iniciais
Temperatura do Biogás (°C)	25
Nº de estágios teóricos	12
Pressão nas colunas (atm)	10
Vazão mássica de biogás (Kg/h)	1011

Fonte: O Autor, 2023

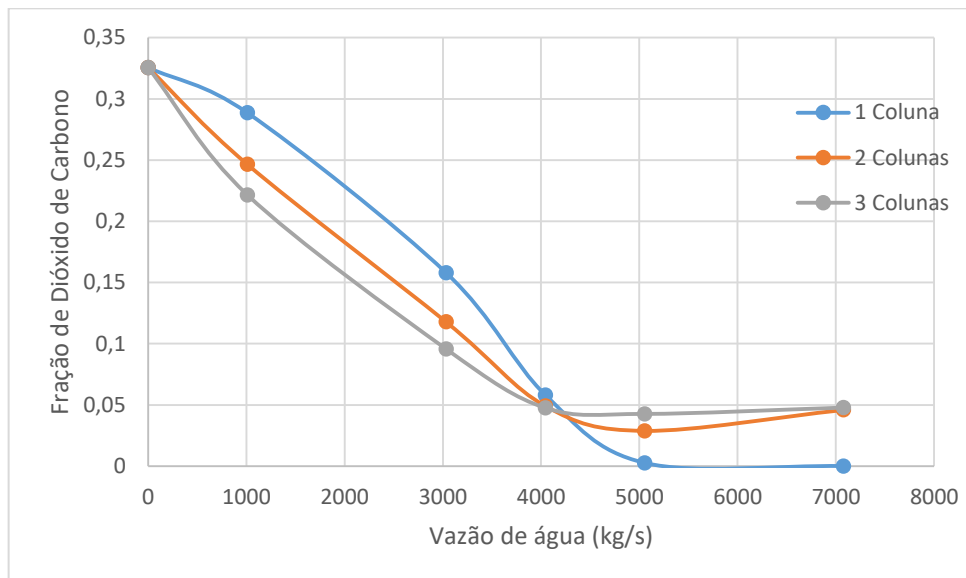
As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 ilustram a fração molar de metano, dióxido de carbono e água no biogás tratado, respectivamente, em função da corrente de saída de água, para o sistema com uma, duas e três colunas de absorção.

Figura 4.5 – Fração Molar de CH₄ versus Vazão de água



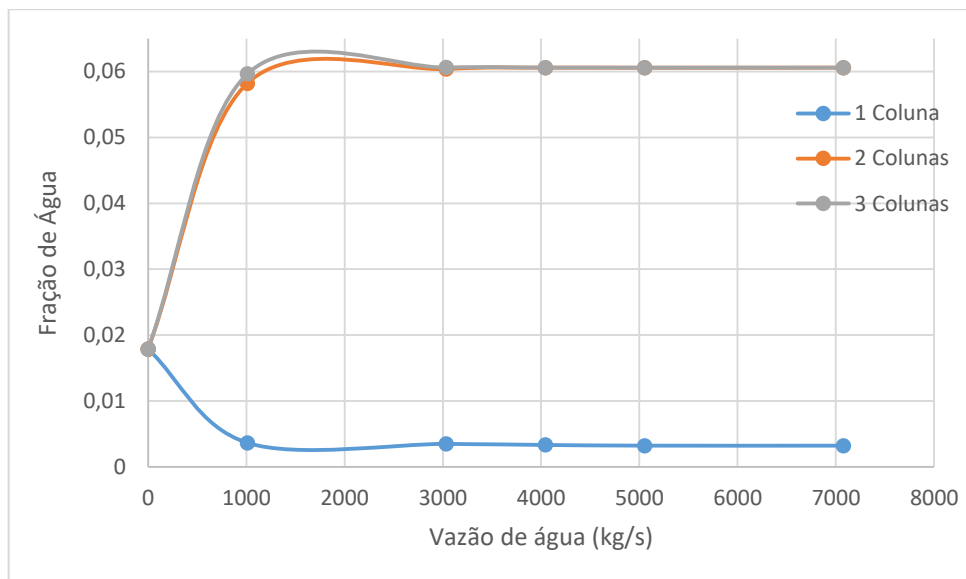
Fonte: O Autor, 2023

Figura 4.6 – Fração Molar de CO₂ versus Vazão de água



Fonte: O Autor, 2023

Figura 4.7 – Fração Molar de H₂O versus Vazão de água



Fonte: O Autor, 2023

Em uma primeira análise (figura 4.5), é possível identificar uma melhora significativa na concentração do metano, com valores superiores a 95% desse modo, o biogás final possui maior poder energético quando comparado com a primeira simulação feita (figura 4.1), atingindo a fração desejada de metano apenas com uma coluna. Quando foi feito a tratamento do biogás (2 e 3 colunas) foi observado um comportamento diferente, ou seja, uma redução na concentração do metano,

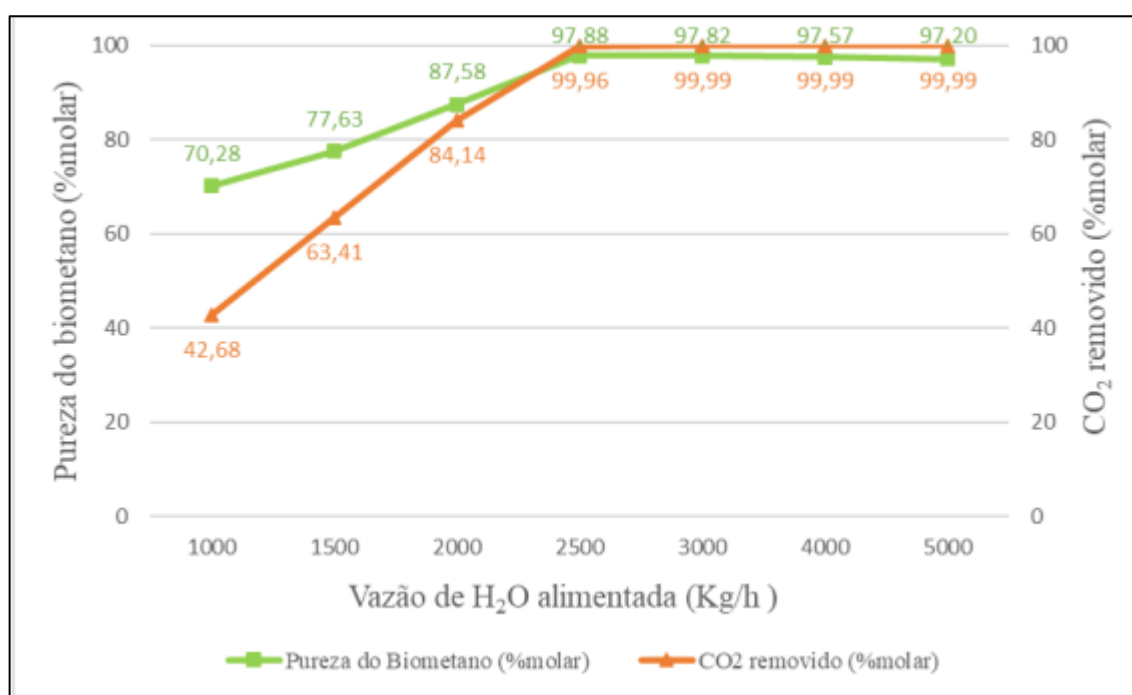
provavelmente, devido ao aumento da fração de água no gás tratado, gerando uma redução na fração de metano.

Comparando a eficácia desse estudo, notou-se o mesmo comportamento nos gráficos das simulações de NETO & GÓIS (2022), utilizando o software ASPEN PLUS® (figura 4.8).

Portanto, através da análise dos gráficos acima, foi observado que é possível atingir a fração próxima a desejada de metano apenas com uma coluna a partir de uma vazão acima de 4000 kg/h de água, e que as associações de mais colunas proporcionaram, novamente, o aumento da fração de água no gás tratado para algo em torno de 6%, diminuindo, bastante, a fração final de metano.

O mesmo comportamento pode ser verificado no trabalho de NETO & GÓIS (2022), com os perfis produzidos a partir do software ASPEN PLUS®, conforme mostra a Figura 4.8.

Figura 4.8 – Frações de purificação de biogás



Fonte: NETO & GÓIS, 2022

De acordo com a figura 4.8 é possível verificar que conforme a disponibilidade de água na coluna e a remoção de CO₂ aumentam, a concentração do metano também aumenta. Portanto, semelhante as condições anteriores estudadas o sistema atua até um certo ponto (próximo a 2500 kg/h), onde consegue concentrar bem o metano; após isso a fração de metano passa a ser constante (99,99%).

Novamente, notou-se o mesmo efeito da adição de colunas e perda de água na forma de vapor para corrente de tratado, indicando, assim, a preferência por usar o sistema com apenas 1 coluna, pois ele alcançou composição de 98% metano, sendo esse valor superior aos trabalhos usados como referência.

A última simulação realizada (cenário 3) foi feita a partir dos valores conhecidos de estágios teóricos e a vazão ideal de água, que estão apresentados na tabela 4.3.

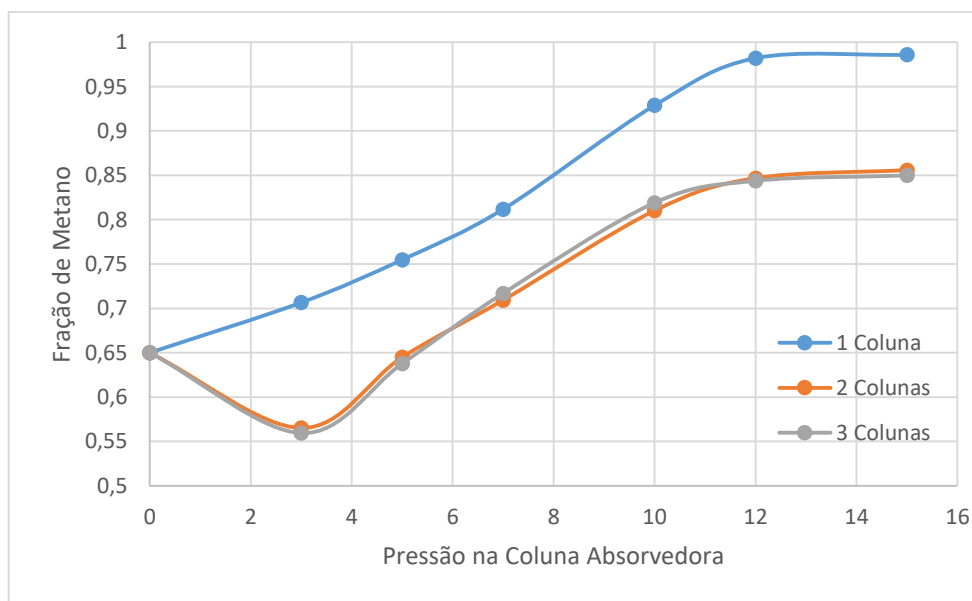
Tabela 4.3 – Valores iniciais de simulação para pressão do sistema

Parâmetros de Operação	Valores iniciais
Temperatura do Biogás (°C)	25
Nº de estágios teóricos	12
Vazão de água (kg/h)	4044
Vazão mássica de biogás (Kg/h)	1011

Fonte: O Autor, 2023

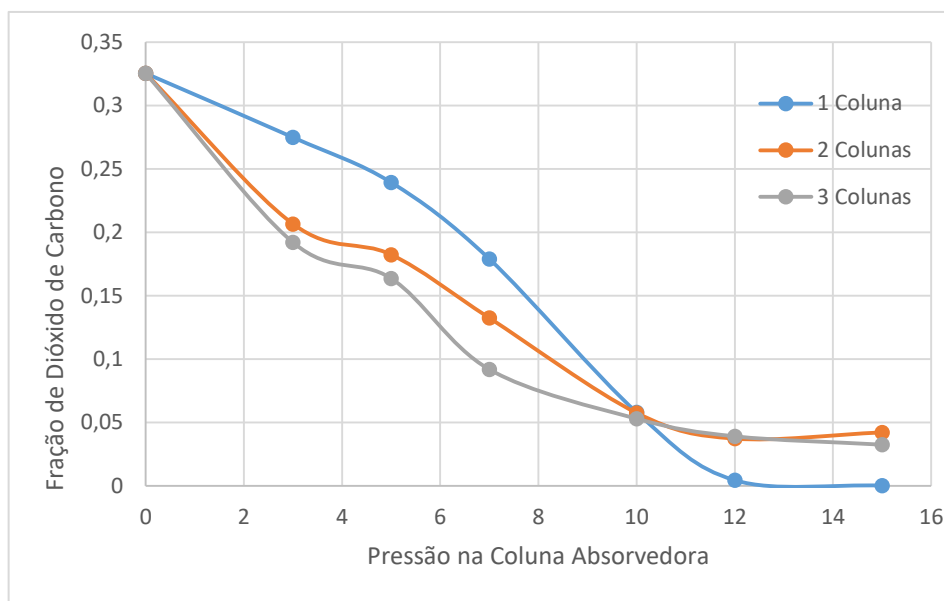
Os perfis obtidos (figura 4.9, 4.10 e 4.11) mostram a fração molar de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico, respectivamente, em função da pressão, para os sistemas com uma, duas e três colunas de absorção.

Figura 4.9 – Fração Molar de CH_4 versus Pressão do Sistema



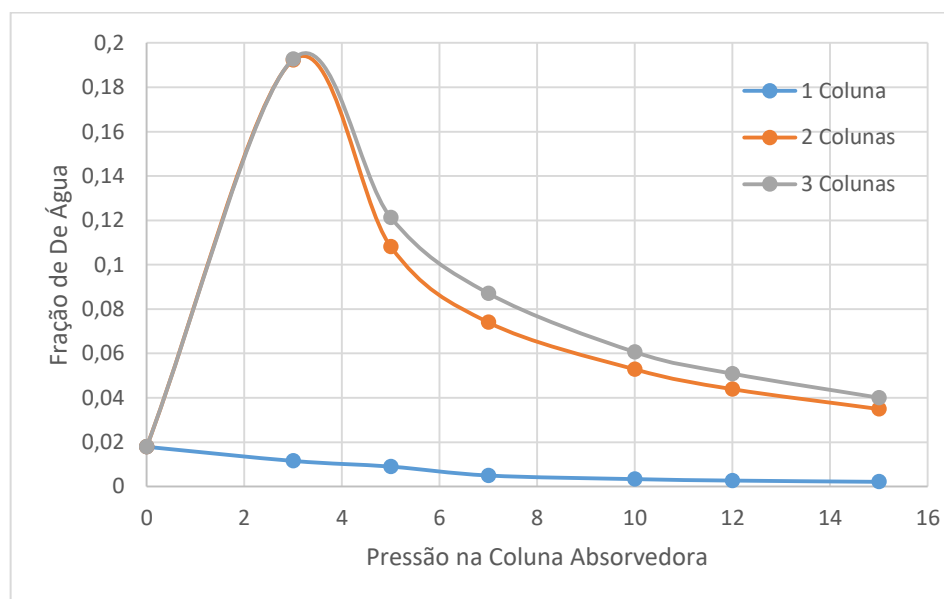
Fonte: O Autor, 2023

Figura 4.10 – Fração Molar de CO_2 versus Pressão do Sistema



Fonte: O Autor, 2023

Figura 4.11 – Fração Molar de H_2O versus Pressão do Sistema



Fonte: O Autor, 2023

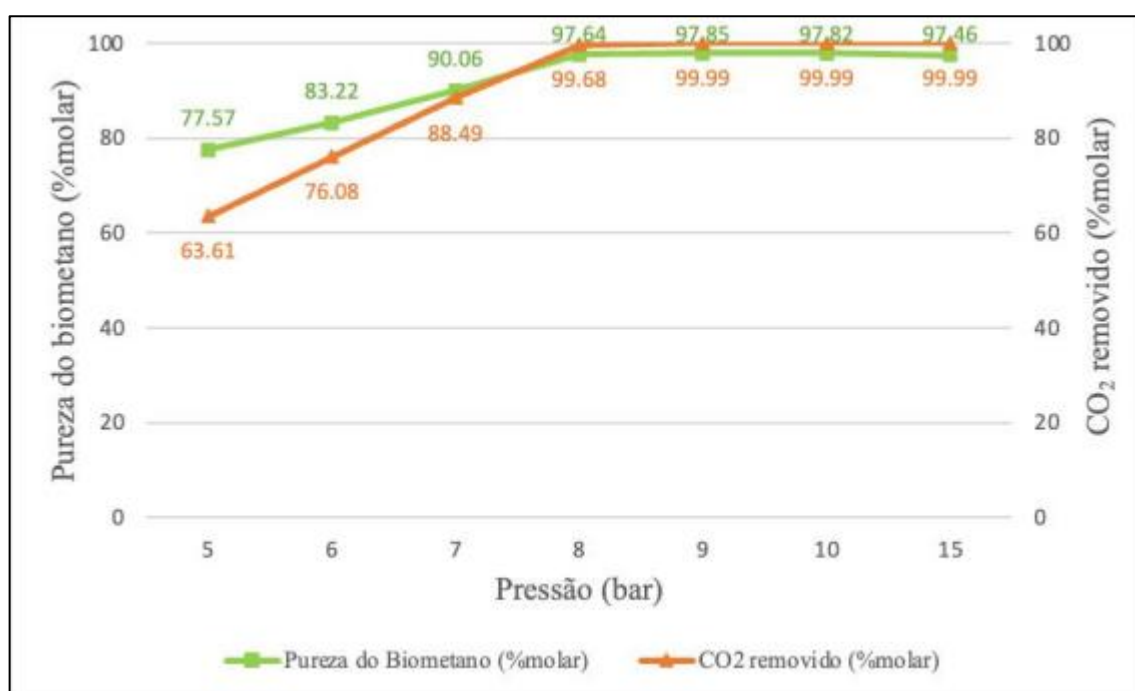
Na figura 4.9, observa-se uma elevação da concentração do metano com uma coluna de absorção. Dessa forma, a curva de fração de metano é sempre ascendente e a curva da fração dos outros componentes é descendente, indicando que o sistema com uma coluna é o mais viável em comparação com as outras simulações.

Na figura 4.10 é possível perceber o efeito do aumento da pressão na redução da fração molar do dióxido de carbono na corrente de tratado. Isso ocorreu, porque o

aumento da pressão, proporcionou um aumento da solubilidade do gás no líquido. Com isso, no processo de absorção estudado, aumentando-se a pressão da coluna ocorre consequentemente o aumento na solubilidade do CO_2 na água. Segundo BASHAR (2018), esse efeito ocorre devido ao aumento da frequência de colisões das moléculas existente no meio.

Na figura 4.11, nas primeiras faixas de pressão, a presença crescente de água na forma de gás na corrente do tratado para o sistema com duas e três colunas, porém ao pressurizar o sistema a fração de água é reduzida. Vale ressaltar que esse efeito não é identificado de forma mais pronunciada quando o biogás é tratado com apenas uma coluna de absorção. O mesmo comportamento também ocorreu no trabalho de NETO & GÓIS (2022), que utilizou o software de simulação Aspen Plus® para avaliar o processo de purificação do biogás, sendo alguns dos resultados apresentados na figura 4.12.

Figura 4.12 – Frações de Purificação de Biogás



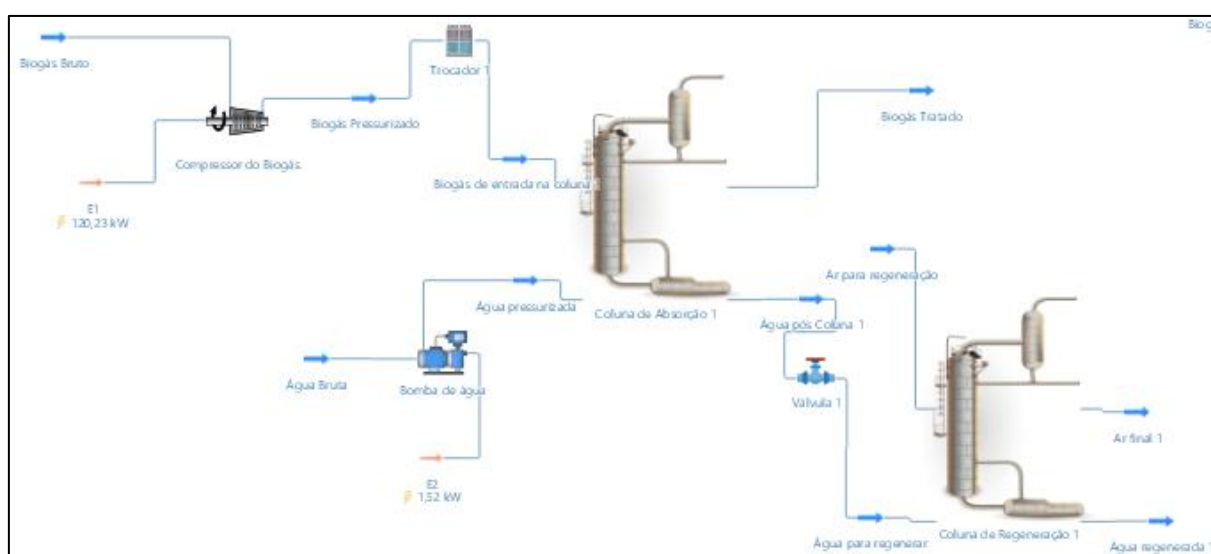
Fonte: NETO & GÓIS, 2022

De acordo com a figura 4.12 o mesmo efeito ocorreu com o aumento da pressão: aumento da solubilidade do dióxido de carbono e aumento da concentração do biogás. Observando os resultados, percebeu-se o mesmo comportamento em todas as simulações, indicando que o fator decisivo para o uso de uma coluna no lugar

de duas ou três é que a associação de colunas promove a vaporização da água, e “diluição” do metano.

Dessa maneira, reduzindo a pureza do gás de interesse nos sistemas de purificação com duas e três colunas, que atingiram no máximo 85% de metano na composição final, reduziu-se também o P.C.I do gás e, conseqüentemente, não foi possível alcançar os objetivos de economia de outras fontes de combustíveis. Portanto, para dar sequência ao estudo, escolheu-se a pressão de 12 atm para o sistema de uma coluna, pois nessa faixa a pureza do metano é superior a 97%. A figura 4.13, mostra o fluxograma do resultado do processo de purificação do biogás via processo de absorção utilizando a água como fluido absorvente. As tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam respectivamente: dados otimizados do sistema para uma coluna, dados das correntes do biogás e dados do sistema de regeneração da água.

Figura 4.13 – Sistema com uma coluna



Fonte: O Autor, 2023

Tabela 4.4 – Dados gerais do sistema para uma coluna

Pressão Total do Sistema (atm)	12
Vazão de água (kg/s)	4044
Nº de estágios teóricos	12
Gasto elétrico do sistema (kW)	255,52

Fonte: O Autor, 2023

Tabela 4.5 – Dados das correntes de biogás

Corrente	Biogás Bruto	Biogás Tratado
Pressão (atm)	1	12
Vazão mássica (kg/h)	1011,00	324,42
Vazão volumétrica (m ³ /h)	975,93	39,93
Fração molar (CO ₂)	0,3255	0,0042
Fração molar (CH ₄)	0,650	0,982
Fração molar (H ₂ S)	6 x 10 ⁻⁴	1,9 x 10 ⁻¹¹

Fonte: O Autor, 2023

Tabela 4.6 – Dados do sistema de regeneração da água

Corrente	Captação de água	Água Regenerada
Pressão (atm)	1	1
Vazão mássica (kg/h)	4044,00	4663,68
Fração molar (H ₂ O)	1	0,9875
Fração molar (CO ₂)	0	2,7 x 10 ⁻³
Fração molar (H ₂ S)	0	8,4 x 10 ⁻³

Fonte: O Autor, 2023

A problemática envolvendo a diminuição da fração do metano no biogás tratado pela vaporização da água durante o processo de reuso da água é encontrada na literatura, sendo esse entrave característico do processo de enriquecimento de biometano utilizando água através do processo de absorção física. Logo, o processo necessita de equipamentos para retirar a umidade e ainda, a adição de membranas para remoção do H₂S. A tabela 4.7 apresenta dados finais obtidos para a corrente de biogás tratado para comparar os dados obtidos como os dados de outros trabalhos

que tiveram o mesmo objetivo. Os dados foram comparados com os estudos de AGENA *et al* (2020), SEMAN & HAURAN (2019) e NETO & GÓIS (2022).

Tabela 4.7 – Dados finais obtidos para a corrente de Biogás tratado

	Sistema com uma coluna	AGENA <i>et al</i> (2020)	SEMAN & HAURAN (2019)	NETO & GÓIS (2022)
Fração molar inicial de CH ₄ (%)	65	60	60	60
Fração molar inicial de CO ₂ (%)	32,5	39,5	38,9	38,9
Fração molar final de CH ₄ (%)	98,2	96,71	97,6	97,88
Fração molar final de CO ₂ (%)	0,42	2,84	-	-
Remoção molar de CO ₂ (%)	98,70	-	99,93	99,99

Fonte: O Autor, 2023

De acordo com a tabela 4.7 verificou-se que os resultados obtidos foram semelhantes aos trabalhos da literatura, como o de SEMAN & HAURAN (2019) e NETO & GÓIS (2022), ambos com o mesmo tema de sistemas de absorção com água pressurizada. Assim, pode-se inferir que o arranjo e a simulação realizada validam o uso do DWSIM para esse tipo de simulação, pois os valores foram próximos, e até superior em comparação com as referências da literatura.

Tendo em vista o potencial energético do biogás em vários setores da indústria, como por exemplo a agroindústria, é importante ter conhecimento do poder de queima do biogás. O trabalho de ROSSETO (2014) possui uma tabela que mostra a composição e o poder calorífico interno do biogás (tabela 4.8) e foi usada como base para obter o Poder Calorífico Inferior do Biogás *versus* Fração de Metano (figura 4.14).

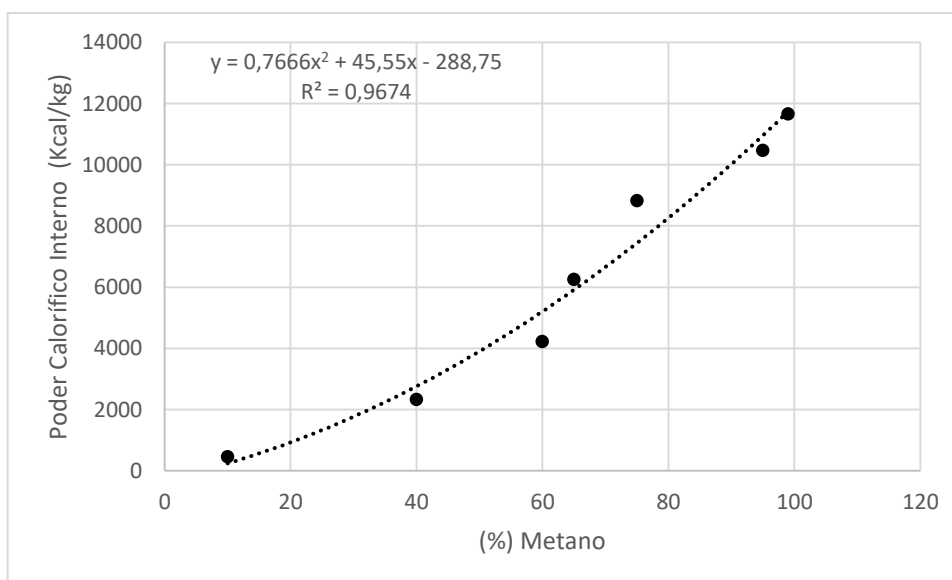
Tabela 4.8 – Poder Calorífico Inferior do Biogás

Quantidade de metano na composição química do Biogás (%)	Poder Calorífico Inferior (Kcal/Kg)
10	465
40	2339
60	4230
65	6253
75	8831
95	10470
99	11661

Fonte: ROSSETO, 2014

Utilizando os dados de ROSSETO (2014), foi possível gerar um gráfico do poder calorífico inferior do biogás *versus* fração de metano e em seguida, fazer uma regressão linear dos dados e encontrar uma equação que possibilita obter o poder calorífico interno do biogás em outras frações, conforme pode ser observado na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Poder Calorífico Inferior do Biogás versus Fração de Metano



Fonte: Adaptado de ROSSETO, 2014.

Na Tabela 4.9, tem-se um resumo das propriedades do biogás tratado e do biogás bruto.

Tabela 4.9 – Dados energéticos das correntes de biogás

Dados	Biogás Bruto	Biogás Tratado
Fração de Metano (%)	0,65	0,982
P.C.I (Kcal/Kg)	6253,01	11576,76
Vazão (Kg/s)	0,2803	0,0901
Potência (KW)	7338,28	4367,11

Fonte: O Autor, 2023.

Conforme a tabela 4.9, a potência final da corrente do biogás bruto é maior que do biogás tratado obtido. Isso ocorreu, pois, ao tratar o biogás, além de remover os subprodutos, há pequenas perdas mássicas de metano, o que reduz a corrente mássica total e a corrente de metano final no gás tratado. Ainda que o poder calorífico inferior aumentasse consideravelmente, pois o gás está com maior fração molar de metano, a vazão mássica é reduzida, e como a potência é um produto desses dois fatores, o biogás bruto acaba favorecido pois sua corrente mássica é quase que o triplo em relação ao tratado.

A economia das fontes de biomassa é vista na tabela 4.10 e mostra diferentes P.C.I, economia mensal gerada pelo biogás bruto e a economia mensal gerada pelo biogás tratado para diferentes biomassas.

A partir dos dados de energia obtida com o biogás bruto e tratado e fontes de biomassa diferentes, é possível fazer uma análise da economia mensal.

Tabela 4.10 – Economia das fontes de biomassa

Biomassa	P.C.I (Kcal/Kg)	Economia mensal gerada pelo Biogás Bruto (ton/mês)	Economia mensal gerada pelo Biogás tratado (ton/mês)
Lenha	3100	1465,5	872,1
Eucalipto	4024	1128,9	671,8
Bagaço de Cana	4174	1088,4	647,7
Casca de Arroz	3200	1419,7	844,8
Palha de Arroz	3821	1188,9	707,5
Capim-Elefante	3441	1320,2	785,7
Palha de Milho	4227	1074,7	639,6

Fonte: O Autor, 2023

Conforme a tabela 4.10, notou-se que os dados mostram que tanto biogás bruto quanto o tratado proporcionam grande economia de biomassas se forem destinados à queima. No entanto, o biogás bruto gera mais economia, pois sua vazão mássica alta compensa o seu PCI inferior ao do biogás tratado. Nos dois casos, há uma economia de fontes tradicionais de biomassa (como lenha, bagaço etc.), que são usadas em caldeiras ou queimadores.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados encontrados, foi possível obter um biogás tratado com fração mássica de 98% de metano a partir do processo físico da absorção, utilizando apenas uma coluna e a água como fluido absorvente.

A adição de colunas em série (duas ou três colunas de absorção) promoveu a vaporização da água e, como consequência, a diluição do metano no biogás tratado, causando a redução do poder energético do biogás.

O aumento da pressão proporcionou um aumento na redução da fração molar do dióxido de carbono na corrente de tratado, devido ao aumento da solubilidade.

Através da comparação com a literatura científica foi possível encontrar uma similaridade com os dados obtidos da simulação em todas as etapas do trabalho.

Os resultados da simulação para validação do DWSIM confirmaram a eficiência do software para simular a purificação do biogás via absorção, pois o erro foi de apenas 0,2% quando comparado com as mesmas condições no Aspen Plus®, software comercial mundialmente usado.

A composição do biogás tratado obtido foi de 98% e a vazão foi de 324 kg/h, o que proporcionou uma potência de queima capaz de gerar economia significativa das outras fontes de biomassa, ocasionando assim o aproveitamento desse efluente e a redução nos gastos mensais da indústria.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, P. L. Uso de carvões ativados modificados por soluções alcalinas na separação de CH₄ e CO₂ para enriquecimento do biogás. Universidade Federal de Pernambuco, Campus Recife - PE, 2017.
- AGENA, H. S., Modelagem e simulação da purificação do biogás advindo da vinhaça. 29º Encontro Anual de Iniciação Científica & 9º Encontro Anual de Iniciação Científica Júnior. Universidade Estadual de Maringá, campus Maringá – PR, 2020.
- AIR PRODUCTS. Disponível em: < <https://www.airproducts.com.br/supply-modes/gen-gas-on-site/onsite-nitrogen-generation/cryogenic-nitrogen-plant>> Acesso em 15 de novembro de 2023.
- ANDRIANI, D. *et al.* A review on optimization production and upgrading biogas through CO₂ removal using various techniques. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, New York, EUA, v. 172, n. 4, p. 1909–1928, 2013.
- ANDRIATTA, A. A. Avaliação teórica de diferentes processos de purificação de biogás. Universidade Federal de São Paulo, campus Diadema - SP, 2021.
- ARAÚJO, A.P. C. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Universidade Federal de Uberlândia, campus Uberlândia - MG, 2017.
- BASHAR, M. A. Biogas quality improvement using water wash and phosphorus recovery as struvite in Jones Island WWTP (Doctoral dissertation, The University of Wisconsin-Milwaukee), 2018.
- BASU, S., *et al.* Membrane-based technologies for biogas separations. *Chemical Society Reviews*, Leuven, Bélgica, v. 39, n. 2, p. 750–768, 2010.
- CARDOSO, T. F. Cogeração de energia através do bagaço de cana-de-açúcar: Revisão de literatura. Universidade Federal de São Carlos, Campus Sertãozinho - SP, 2011.
- DEUBLEINB, D., STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources, WILEY-VCH Verlag. KGAA, Weinheim, 2008.
- GRANDO, I. Z. Digestão anaeróbia de bagaço de cana-de-açúcar em batelada para produção de biogás. Universidade de São Paulo, campus São Paulo – SP, 2021.
- HILL, D. & JUSTICE, F. C. Understand Thermodynamics to Improve Process Simulations. American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 2011.
- ISET. Biogasaufbereitung zu Biomethan. Institut für Solare Energieversorgungstechnik Verein an der Universität, 2008.
- KARLSSON, T. *et al.* Manual Básico do Biogás. Editora Univates. 1ª edição, Lajeado – RS, 2014.

KUNZ, A., *et al.* Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Embrapa Suínos e Aves. 2019

MANERA, C., *et al.* Projeto, construção e avaliação de um sistema de adsorção por variação de pressão. Universidade Caxias do Sul, campus Caxias do Sul – RS, 2017.

MARTINEZ, D. G, *et al.* Biogás Brasil. Operação e Monitoramento de Reatores Anaeróbios: Guia de Boas Práticas. 2020

MOREIRA, L. C., *et al.* Simulação de Processos Aplicada na Avaliação de Alternativas para Purificação do Biogás Proveniente da Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Rio de Janeiro - RJ, 2021.

NETO, M. W & GÓIS, L.M.N. Simulação e Otimização da Absorção de CO₂ com água no tratamento de biogás, 2022.

NOYOLA, A., *et al.* Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: Odor control and energy/resource recovery. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, Coyoacán, México, v. 5, n. 1, p. 93–114, 2006.

PARANHOS, J. F. Método dos Modelos Termodinâmicos Simplificados (MMTS): Uma Abordagem Eficiente para Descrever o Equilíbrio Líquido-Vapor. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2014.

REIS, L. Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/>>. Acesso em 15 de novembro de 2023.

ROSSETO, C. Desempenho de moto-gerador de ciclo Otto operando com gasolina e biogás proveniente de suinocultura e de uma estação de tratamento de esgoto. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus Cascavel - PR, 2014.

SCARLAT, N., *et al.* Biogas: Developments and perspectives in Europe. Renewable Energy, v. 129, p. 457–472, 2018.

SECHI, R. D., Beneficiamento de biogás via absorção com água pressurizada: um estudo dos parâmetros de operação e de projeto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, campus Porto Alegre - RS, 2019.

SEMAN, N. A & HARUN, N. Simulation of pressurized water scrubbing process for biogas purification using Aspen Plus. Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 702, nº 1, 2019.

SMITH, V.N, *et al.* Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química. 8ª edição. Editora LTC, 2019.

TRENTIN, V. M. Aplicação da tecnologia de membranas poliméricas para purificação de biogás. Universidade Caxias do Sul, Campus Caxias do Sul – RS, 2017.

YAN, W & SUPPES, G. J. “Low-pressure packed-bed gas-phase dehydration of glycerol to acrolein”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 48, no. 7, pp. 3279–3283, 2009.

YOUSEF, A. M., *et al.* Upgrading biogas by a low-temperature CO₂ removal technique. *Alexandria Engineering Journal*, Alexandria, Egito, v. 55, n. 2, p. 1143–1150, 2016.

ZENATTI, D. Biometano: Obtenção e Aproveitamento. *Engenharia Química*. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande – MS, 2019.

APÊNDICE

Apêndice 1 – Dados para validar eficácia do DWSIM na simulação

	Sistema com uma coluna	NETO & GÓIS (2022)
Fração molar inicial de CH ₄ (%)	60	60
Fração molar inicial de CO ₂ (%)	38,9	38,9
Fração molar inicial de O ₂ (%)	0,5	0,5
Fração molar inicial de N ₂ (%)	0,5	0,5
Fração molar inicial de H ₂ S	300 ppm	300 ppm
Pacote Termodinâmico	NRTL	NRTL
Temperatura do Biogás (°C)	25	25
Pressão do Biogás (atm)	1	1
Vazão do Biogás (kg/h)	604,6	604,6
Vazão de água (kg/h)	3000	3000
Pressão da Coluna (atm)	9	9
Nº de estágios	18	18
Fração molar final de CH ₄ (%)	97,68	97,88
Remoção molar de CO ₂ (%)	99,90	99,99
Erro da Fração de CH ₄ (%)	0,2	-
Erro da Fração de CO ₂ (%)	0,09	-

Fonte: O Autor, 2023