

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA SENAI: CENTRO DE TECNOLOGIA DA
INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL

Laura da Silva Bezerra

**Projeto Conceitual de uma Planta de Remoção de CO₂ de Biogás de Aterro Sanitário por
Permeação em Membranas**

Rio de Janeiro

2024

Laura da Silva Bezerra

**Projeto Conceitual de uma Planta de Remoção de CO₂ de Biogás de Aterro Sanitário por
Permeação em Membranas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador(a): Roberto Bentes de Carvalho

Rio de Janeiro

2024

FICHA CATALOGRAFICA

Bezerra, Laura.

Projeto Conceitual de uma Planta de Remoção de CO₂ de Biogás de Aterro Sanitário por Permeação em Membranas / Laura da Silva Bezerra. – 2024.

f.89; 30 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)–SENAI CETIQT, Rio de Janeiro, 2024.

1.Permeação de gases por membranas, 2. Biogás de aterro sanitário, 3. Biometano, 4. FEL. I. Bentes de Carvalho, Roberto (Orientador). II. SENAI CETIQT. III. Título.

Laura da Silva Bezerra

**Projeto Conceitual de uma Planta de Remoção de CO₂ de Biogás de Aterro Sanitário por
Permeação em Membranas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Aprovada em: 18/06/2024

Aprovado por:

Orientador: Prof. Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc., SENAI CETIQT

Banca Examinadora:

Bárbara de Souza Bergamo, Eng., MERCURIO *PARTNERS*

Mateus Mansano do Nascimento, Eng., GÁS VERDE

Prof. Héctor Napoleão Cozendey da Silva, D.Sc., SENAI CETIQT

Rio de Janeiro

2024

A Deus e aos meus pais pela dádiva da vida e àqueles que
sempre me apoiam para que eu nunca desista dos meus
sonhos e que vibram comigo a cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por sempre iluminar o meu caminho e me permitir chegar até aqui. Agradeço aos meus familiares que estiveram me apoiando desde o início, em especial à minha mãe Silvia, por todo o esforço para que eu pudesse alcançar os meus objetivos, à minha tia Tereza e ao meu avô José, por me ajudarem a continuar os estudos, à minha avó Miriam e à minha madrinha Kelly, por todo o suporte dado ao longo desses anos.

Sou grata também aos excelentes professores que passaram pela minha vida acadêmica e que ajudaram a construir minha formação. Um reconhecimento especial ao meu orientador Roberto Bentes por toda orientação e confiança passada.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos. Aqueles que estiveram comigo desde a infância, Victor, Marcos, Mariana, Beatriz e Stella. Aos que me acompanharam desde o início da faculdade, Juliana, Gustavo, Giuliana, Jeferson, Raquel e aqueles que vivenciam junto a mim esse momento tão importante, Karina, Maria Eduarda, Brenno e Matheus. Deixo aqui também meus sinceros agradecimentos aos meus amigos que mesmo de longe sempre se fazem presente sendo minha rede de apoio, Kalinke, Marcela, Janaína, Roberta, Luciana, Camila, Raquelaine, Kelly, Gustavo, Matheus Vinicius e Henrique.

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”
(Antoine Laurent Lavoisier)

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um projeto conceitual de uma planta de remoção de CO₂ de biogás utilizando a permeação em membranas, baseado em dados de uma planta real de tratamento de biogás de aterro sanitário. A tecnologia de permeação de gases por membranas permite a separação do CO₂ do CH₄ através do mecanismo de sorção-difusão. O biogás de aterro é composto por outros componentes, como H₂S, siloxanos, VOCs, entre outros que também precisam ser removidos. Entretanto, foi considerado que o biogás já havia passado por uma etapa de pré-tratamento, onde outras tecnologias foram aplicadas para a remoção desses compostos, mas esta etapa não fez parte do escopo do projeto. Ao final desse processo, o produto obtido é o biometano, um gás combustível com características semelhantes ao gás natural. O desenvolvimento do projeto foi baseado na metodologia *Front-End-Loading* (FEL), amplamente utilizada desde a fase de concepção até a etapa que precede a construção e operação da planta. Foram estabelecidas as premissas do processo a partir da adaptação de um projeto de uma planta de produção de biometano que utiliza biogás de aterro, foram desenvolvidos a tabela de processos, o diagrama de blocos, o fluxograma de processo, e o balanço de massa e energia do processo, além do dimensionamento da membrana (principal equipamento do processo). Devido à falta de padronização nos módulos de membranas para separação de gases do biogás, foi criado um formulário baseado na técnica *Delphi* para avaliar, junto a especialistas da área, a melhor opção de módulo de membrana a ser utilizado no projeto. Com base nas respostas dos participantes e na literatura, escolheu-se o módulo de membrana do tipo fibra oca assimétrica à base de poliimida com camada seletiva interna. Ao todo o processo contou com dois estágios de módulos de membranas e foi preciso dimensionar as áreas totais de membranas de cada estágio para atender a produção de 4000 m³/h de biometano. Foi obtida uma área total de membrana no primeiro estágio de 23.081 m² e de 26.506 m² para o segundo. Por fim, o biometano produzido apresentou 97,2% de metano em sua composição e um poder calorífico superior (PCS) de 36.627,30 kJ/m³. Ele atendeu às especificações exigidas pela resolução da ANP, demonstrando assim, a eficiência da tecnologia de permeação de gases por membranas. Ao optar pelo biometano ao invés do gás natural houve uma redução de 99,91% de emissões de gases poluentes, portanto, o biometano apresenta-se como uma alternativa viável para desaceleração do avanço das mudanças climáticas.

Palavras-chave: 1. Permeação de gases por membranas, 2. Biogás de aterro sanitário, 3. Biometano, 4. FEL

ABSTRACT

The main objective of this work was to develop a conceptual design for a CO₂ removal plant from biogas using membrane permeation, based on data from a real landfill biogas treatment plant. The technology of gas permeation through membranes allows for the separation of CO₂ from CH₄ through the sorption-diffusion mechanism. Landfill biogas is composed of other components such as H₂S, siloxanes, VOCs, among others that also need to be removed. However, it was considered that the biogas had already gone through a pre-treatment stage, where other technologies were applied to remove these compounds, but this stage was not part of the scope of the project. At the end of this process, the product obtained is biomethane, a fuel gas with characteristics similar to natural gas. The project development was based on the Front-End-Loading (FEL) methodology, widely used from the conception phase to the stage preceding the construction and operation of the plant. The assumptions of the process were established from the adaptation of a project of a biomethane production plant that uses landfill biogas, the process table, the block diagram, the process flowchart, and the mass and energy balance of the process were developed, in addition to the sizing of the membrane (main equipment of the process). Due to the lack of standardization in the biogas separation membrane modules, a *Delphi* technique-based form was created to evaluate, together with experts in the field, the best membrane module option to be used in the project. Based on the participants' responses and the literature, the asymmetric hollow fiber-membrane module made of polyimide with an internal selective layer was chosen. In all, the process had two stages of membrane modules and it was necessary to size the total membrane areas of each stage to meet the production of 4000 m³/h of biomethane. A total membrane area of 23,081 m² in the first stage and 26,506 m² for the second stage was obtained. Finally, the biomethane produced had 97.2% methane in its composition and an upper calorific value (PCS) of 36,627.30 kJ/m³, meeting the composition specifications and PCS required by the ANP resolution. It met the specifications required by the ANP resolution, thus demonstrating the efficiency of membrane gas permeation technology. By opting for biomethane instead of natural gas, there was a 99.91% reduction in polluting gas emissions, therefore, biomethane presents itself as a viable alternative to slow down the advance of climate change.

Keywords: 1. Gas permeation by membranes, 2. Landfill biogas, 3. Biomethane, 4. FEL

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 -	Gravimetria dos RSU no Brasil em 2022.....	16
Figura 1.2 -	Mapa de produtores de biometano em território nacional.....	20
Figura 2.1 -	Etapas da decomposição anaeróbica de materiais orgânicos.....	23
Figura 2.2 -	Número de plantas e volume de biogás produzido por setor no Brasil em 2022.....	25
Figura 2.3 -	Infográfico de uma estação de captação de biogás em aterro sanitário.....	26
Figura 2.4 -	Aplicações para conversão do biogás em energia.....	27
Figura 2.5 -	Usina de geração de energia através do biogás de aterro sanitário.....	28
Figura 2.6 -	Perspectivas para o consumo global de biogás por setor no cenário de políticas declaradas, 2018-2040.....	28
Quadro 2.1 -	Comparação das tecnologias de separação de CO ₂ /CH ₄	30
Quadro 2.2 -	Fornecedoras de membranas no ramo de purificação de biogás.....	33
Quadro 2.3 -	Principais materiais para membranas de separação de gases.....	34
Figura 2.7 -	Principais tipos de membrana.....	35
Figura 2.8 -	Membranas porosas e densas.....	35
Figura 2.9 -	Representação do mecanismo de transporte de gases por membranas poliméricas densas.....	37
Quadro 2.4 -	Comparação entre os módulos de fibra oca, espiral e envelope.....	39
Figura 2.10 -	Principais tipos de membranas de módulo fibra oca.....	40
Figura 2.11 -	Dois tipos de módulos de fibra oca utilizados na separação de gases...	41
Figura 2.12 -	Arranjo com um único estágio.....	42
Figura 2.13 -	Arranjos com dois estágios.....	42
Figura 2.14 -	Arranjo com três estágios.....	43
Figura 2.15 -	Arranjo SEPURAN® GREEN de um sistema com três membranas...	43
Quadro 2.5 -	Ciclo de vida de um projeto de engenharia de areias petrolíferas.....	45
Figura 2.16 -	Desenvolvimento do projeto e linha do tempo de execução.....	45
Quadro 2.6 -	Entregas padrão do FEL.....	45
Quadro 2.7 -	Produtos entregáveis em cada fase do FEL.....	47
Figura 3.1 -	Diagrama de blocos das etapas de desenvolvimento do projeto	

	conceitual.....	48
Quadro 3.1 -	Questões para o mapeamento das diferentes configurações de módulos de membrana para remoção de CO_2 do biogás.....	50
Figura 3.2 -	Esquema da unidade de purificação de biogás.....	52
Figura 3.3 -	Modelo de folha de rosto BFD.....	53
Figura 4.1 -	Gráfico das respostas das questões 01, 02 e 03.....	55
Figura 4.2 -	Desenho gráfico do módulo de membrana selecionada.....	58
Figura 4.3 -	Tabela de processos da SGM preenchida.....	59
Figura 4.4 -	Diagrama de blocos do processo de SGM contendo o balanço de massa preliminar.....	61
Figura 4.5 -	Simulação do processo de separação de gases do biogás por membrana no <i>Aspen Plus</i> [®]	64
Figura 4.6 -	Fluxograma de processo com balanço de massa e energia.....	70
Figura 4.7 -	Recorte do balanço de massa e energia no PFD.....	73
Figura 4.8 -	Recorte da lista de equipamentos do processo.....	73
Figura 4.9 -	Recorte do campo de notas gerais.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Contribuições das emissões dos GEE para o aumento da temperatura global no intervalo de 2010-2019 em relação a 1850-1900.....	17
Tabela 2.1 - Composição típica do biogás de aterros sanitários e biodigestores.....	24
Tabela 2.2 - Composição do biogás de aterros sanitários.....	24
Tabela 2.3 - Composições típicas do biometano e do gás natural.....	29
Tabela 3.1 - Parâmetros pré-definidos no processo de SGM.....	51
Tabela 4.1 - Dados de entrada para simular o processo de SGM no Aspen Plus®.....	63
Tabela 4.2 - Resultados da simulação do processo de SGM <i>Aspen Plus</i> ®.....	65
Tabela 4.3 - Parâmetros para o cálculo da entalpia de combustão.....	67
Tabela 4.4 - Permeabilidades do CO ₂ e CH ₄ em membranas de poliimida a partir da média aritmética das permeabilidades encontradas na literatura.....	77
Tabela 4.5 - Dimensionamento da membrana do 1° e 2° estágio.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEGÁS	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado
ABIOGÁS	Associação Brasileira do Biogás
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AFE	<i>Appropriation For Expenditure</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo
BFD	<i>Block Flow Diagram</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do Efeito Estufa
GN	Gás Natural
FED	<i>Front End Design</i>
FEED	<i>Front End Engineering Design</i>
FEL	<i>Front-End Loading</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MME	Ministério do Meio Ambiente
P&ID	<i>Piping And Instrumentation Diagram</i>
PFD	<i>Process Flow Diagram</i>
RNG	<i>Renewable Natural Gas</i>
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SCFM	<i>Standard Cubic Feet per Minute</i>
SGM	Separação de Gases por Membrana
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIMP	Sistemas de Movimentação de Produtos
STP	<i>Standard temperature and pressure</i>
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 INTRODUÇÃO	16
1.2 OBETIVOS	18
1.1.1. Objetivo Geral.....	18
1.1.2. Objetivos Específicos	19
1.3 JUSTIFICATIVA.....	19
1.2. DELIMITAÇÃO	21
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1. O BIOGÁS	22
2.1.1. Características e Origem.....	22
2.1.2. Aterros Sanitários	26
2.1.3. Aplicações do Biogás.....	27
2.2. BIOMETANO.....	29
2.2.1. Tecnologias de Separação de CO₂/CH₄.....	30
2.3. MEMBRANAS DE SEPARAÇÃO DE GASES	32
2.3.1. Materiais de Membranas para Permeação de Gases	33
2.3.2. Morfologia de Membranas para Permeação de Gases.....	34
2.3.3. Mecanismo de Transporte dos Gases.....	36
2.3.4. Permeabilidade e Seletividade	38
2.3.5. Tipos de Módulos e Geometrias de Membranas para Permeação de Gases	39
2.3.6. Arranjos de Sistemas de Membranas para <i>Upgrading</i> do Biogás	41
2.1. METODOLOGIA <i>FRONT-END-LOADING</i> (FEL).....	44
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	48
3.1. METODOLOGIA <i>FRONT-END-LOADING</i> FASE 1 (FEL 1)	48
3.1.1 Técnica DELPHI.....	48
3.1.2 Tabela de Processos	50

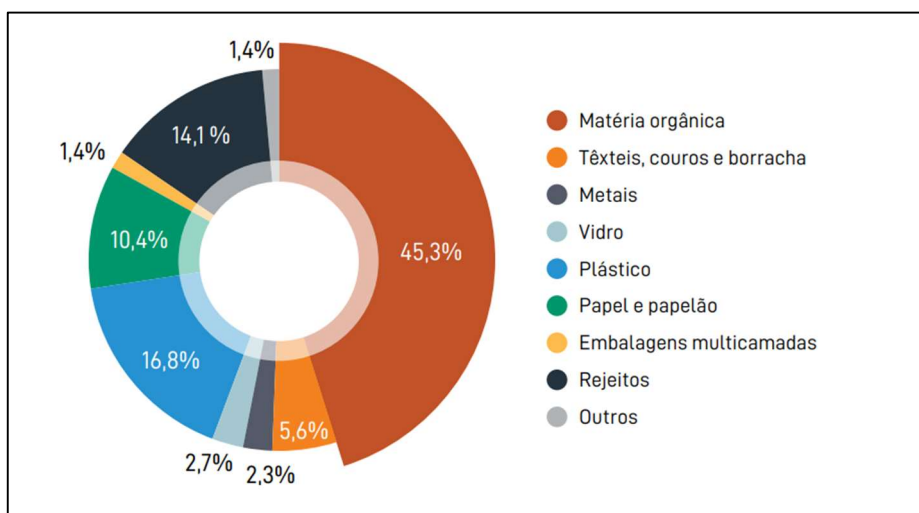
3.1.3	Premissas do Projeto	51
3.1.4	<i>Block Fluxogram Diagram</i> (BFD).....	52
3.1.5	<i>Process Flow Diagram</i> (PFD)	53
3.1.5.1	Balanço de Massa e Energia.....	54
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES		55
4.1	MEMBRANA SELECIONADA	55
4.2	TABELA DE PROCESSOS	58
4.3	<i>BLOCK FLUXOGRAM DIAGRAM</i> (BFD).....	60
4.4	SIMULAÇÃO DO PROCESSO	63
4.5	<i>PROCESS FLOW DIAGRAM</i> (PFD)	69
4.6	DIMENSIONAMENTO DA MEMBRANA	74
4.7	PEGADA DE CARBONO.....	78
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO		80
5.1	CONCLUSÃO	80
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		82
APÊNDICE A – RESPOSTAS DA QUESTÃO 04 DO FORMULÁRIO		87
APÊNDICE B – RESPOSTAS DA QUESTÃO 05 DO FORMULÁRIO.....		88
ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO BIOMETANO ORIUNDO DE ATERROS E ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....		89

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

No contexto atual, é cada vez mais fundamental pensar em alternativas para combater às ameaças climáticas. Uma das soluções essenciais é a substituição de combustíveis fósseis (não renováveis) por combustíveis de fontes renováveis, cuja exploração e uso não agredam o meio ambiente. Além disso, a geração excessiva de resíduos orgânicos é um problema significativo, muitas vezes negligenciado (Eco Circuito, 2020). Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos Brasil (RSU) de 2020, a composição gravimétrica estimada dos RSU coletados no território brasileiro, apresentada na Figura 1.1, mostra que quase a metade da massa dos RSU gerados é matéria orgânica, incluindo sobras de alimentos, resíduos verdes e madeira (Abrelpe, 2020).

FIGURA 1.1 – GRAVIMETRIA DOS RSU NO BRASIL EM 2020.



FONTE: Abrelpe (2020).

Acontece que na decomposição biológica desses resíduos orgânicos, um gás bruto conhecido como biogás é liberado (Brasil, ANP, 2022), cujo seu principal componente, o metano (CH_4), refere-se a um poluente que contribui cerca de 28 vezes mais para o efeito estufa do que o dióxido de carbono (CO_2) (Saboia, 2024). Sua emissão é uma ameaça para o clima global e como evidência dessa criticidade, basta observar os dados dos últimos anos que correlacionam esses gases ao Efeito Estufa. A Tabela 1.1 apresenta as contribuições das

emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEEs) para o aumento do aquecimento global de 2010-2019 em relação a 1850-1900 a partir de estudos de forças radiativas.

TABELA 1.1 – CONTRIBUIÇÕES DAS EMISSÕES DOS GEE PARA O AUMENTO DA TEMPERATURA GLOBAL NO INTERVALO DE 2010-2019 EM RELAÇÃO A 1850-1900.

GEEs	Contribuições	Faixa de aumento da temperatura
Dióxido de carbono	0,8	[0,5 a 1,2]°C
Metano	0,5	[0,3 a 0,8]°C
Óxido Nitroso	0,1	[0,0 a 0,2]°C
Gases Fluorados	0,1	[0,0 a 0,2]°C

FONTE: IPCC (2023).

A partir desses dados, infere-se que o metano teve a segunda maior contribuição para o aquecimento da superfície do planeta no período observado, atrás apenas do CO₂, que também é um componente presente no biogás.

Esse período entre 1850-1900 e 2010-2019, de acordo com IPCC (2023, p. 4), é tido como o espaço de tempo provável para que o homem tenha causado a elevação total da temperatura da superfície global de 0,8 °C a 1,3 °C. Estima-se que nesse intervalo, os GEEs combinados tenham ocasionado um aumento da temperatura entre 1,0 °C e 2,0 °C.

O Brasil, por sua vez, também está entre os maiores emissores globais de metano ao longo dos últimos tempos. De acordo com o recorte de emissões históricas globais publicado pela *World Resources Institute*, só no ano de 2020 o país apareceu na quinta posição com uma emissão de CH₄ aproximada de 459,01 Mt de CO₂e, atrás apenas de China, Estados Unidos, Índia e Rússia (Ge *et al.*, 2020). Ao dar um olhar ainda mais focado para a emissão de CH₄ advindo do setor de resíduos, no mesmo ano, o Brasil emitiu aproximadamente 69,17 Mt CO₂e, o que o deixou na sexta posição entre os maiores emissores de metano nessa categoria. Ao mudar a perspectiva para o cenário mundial, ainda no ano de 2020, a contribuição de metano oriundo de resíduos em relação a sua emissão total nesse período foi de aproximadamente 67%. Portanto, mais da metade das emissões de CH₄ nesse ano vieram do setor de resíduos (Ge *et al.*, 2020).

No entanto, existem opções de mitigação que se apresentam como saída para diminuir essas emissões em pelo menos metade do nível de 2019 até 2030, e uma delas é justamente a redução de metano oriundo de resíduos e tratamento de esgoto (IPCC, 2023). Para pôr em prática essa alternativa, surge como possibilidade, o reaproveitamento desse biogás como matéria-prima para geração de energia ou ainda, se purificado, esse gás se transforma em

biometano que pode ser misturado na rede de gás natural (GN). O GN de acordo com Chuah *et al.* (2018), é um dos recursos energéticos preferidos devido à sua profusão, sua produção já ser bem desenvolvida e descomplicada. Entretanto, esse está longe de ser um combustível ideal, visto que ainda continua sendo de origem fóssil e o seu preço sofre com a incerteza devido às ameaças geopolíticas de países fornecedores.

Pensando nisso, no presente trabalho, foi desenvolvido um projeto conceitual de uma planta de remoção de CO₂ de biogás por meio do processo de separação de gases por membranas (SGM), cujo produto principal obtido é o biometano, um gás semelhante ao gás natural, que ao final do tratamento adquire uma composição rica em CH₄ e pobre em CO₂. Com essas características, ele pode vir a substituir ou complementar o GN em suas diversas aplicações. Para isso, basta a composição do biometano atenda as normas locais, que no caso do Brasil é regulamentada pela Agência Nacional de Petróleo (ANP). Com isso, a captura do biogás além de se apresentar como uma maneira de mitigar as emissões de metano para a atmosfera, dando um novo sentido para a destinação dos resíduos orgânicos e seus derivados, se mostra também como uma alternativa de combustível a partir de sua transformação em biometano.

O projeto executado baseou-se na metodologia *Front-End Loading* (FEL). Trata-se de um processo que inclui todas as etapas de desenvolvimento de um projeto, desde sua idealização até sua montagem e início de operação (Spangler, 2005). Seu objetivo é oferecer etapas bem detalhadas, seguindo um fluxo lógico e um pacote de engenharia bem definido, para garantir que o progresso seja eficiente e robusto, evitando ao máximo mudanças e retrabalho ao longo do projeto (Labadessa, 2008 *apud* Melo, 2014). É de comum acordo entre os autores que possuem estudos nessa área que o FEL é dividido em três fases. O presente trabalho focou em atividades contidas entre as fases 1 e 2, onde a principal atividade realizada foi a construção do Fluxograma de Processo, do inglês *Process Fluxogram Diagram* (PFD).

1.2 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um projeto conceitual de uma planta de remoção de CO₂ de biogás por permeação em membranas, utilizando dados de uma planta real de tratamento de biogás de aterro sanitário.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- Desenvolver uma tabela de processos com as principais informações iniciais para a purificação do biogás utilizando a tecnologia de separação de gases por membranas;
- Construir um diagrama de blocos do processo para servir de base para o fluxograma do processo;
- Selecionar a melhor geometria de membranas, materiais e configurações de módulos para remoção do CO₂ do biogás utilizando a metodologia *Delphi*;
- Elaborar todas as memórias de cálculos relativas ao fluxograma de processo, através da simulação do processo;
- Construir um Fluxograma de Processo (PFD) focado na remoção do CO₂ do biogás;
- Dimensionar o equipamento de permeação de acordo com a capacidade da planta e a configuração do módulo de membrana escolhida;

1.3 JUSTIFICATIVA

A problemática do metano emitido pela decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos começa muito antes de ele chegar na atmosfera, desde o consumo de produtos de natureza orgânica de maneira despreziosa até a sua destinação incorreta. De acordo com Gonçalves *et al.* (2010), a destinação correta do lixo ainda é uma questão alarmante a nível mundial, especialmente em países mais carentes, à falta de investimento nessa área, acarretando riscos para a saúde da população e o meio ambiente. O método dos 3 R's (Reutilizar, Reciclar e Reduzir) é uma forma de mitigar essa problemática, mas não é a solução mais eficiente, sobretudo quando se trata de resíduos orgânicos. É necessário um planejamento voltado para este setor, com mais pesquisas e investimentos, visando não apenas a destinação correta dos

resíduos, mas também a melhoria da qualidade de vida das pessoas, o crescimento econômico e a preservação do meio ambiente.

Ao observar o comportamento do Brasil frente a problemática das emissões de metano, nota-se uma intensificação do compromisso de reduzi-las, exemplo disso é o projeto Metano Zero, uma iniciativa do Governo Federal que visa não só a redução das emissões de CH₄, mas também do preço dos combustíveis, entre outras oportunidades econômicas e estratégicas que foram juntamente apresentadas. Para isso, o programa traz medidas de incentivo ao uso do biogás e biometano com linhas de créditos e financiamento na área, vale destacar que dentre essas atividades financiadas está a implantação de sistema de purificação de biogás, produção e compressão de biometano (Brasil, MME, 2022).

De acordo com o Relatório Dinâmico de Autorizações de Biometano da ANP, atualmente, existem 6 instalações autorizadas pela ANP para produção de biometano em território brasileiro, conforme mostra a Figura 1.2.

FIGURA 1.2 – MAPA DE PRODUTORES DE BIOMETANO EM TERRITÓRIO NACIONAL.



FONTE: Brasil, ANP, SIMP (2024).

Sendo a instalação de maior capacidade a Gás Verde, localizada em Seropédica (RJ), cuja capacidade instalada é de 204 mil Nm³/d (Abegás, 2023). Essa instalação é também a de maior produção na América Latina (Gás Verde, 2024). A lista também inclui as plantas: da GNR Fortaleza de Valorização de Biogás (CE); GNR Dois Arcos de Valorização de Biogás (RJ); da Metagás Biogás e Energia (SP); da Engep Ambiental (SP); e da Cocal Energia (SP). Essa última planta é a única cuja matéria-prima não advém de RSU depositados em Aterros Sanitários. Ademais, 18 instalações espalhadas em diferentes regiões do país estão em construção, demonstrando o atual cenário de crescimento do mercado (Brasil, ANP, 2024).

O setor ainda pode contar com a instalação de 65 novas usinas de produção de biometano até 2029, cuja matéria-prima de 50% delas são resíduos de saneamento, 43% do setor sucroenergético, 6% da agricultura e 1% de proteína animal (Abegás, 2023).

Assim, com a problemática da destinação incorreta dos GEE gerados na digestão anaeróbica de resíduos orgânicos, com a necessidade de se obter um combustível renovável e mais limpo que o GN, tendo em vista também o comprometimento do país em diminuir as emissões de metano com evolução positiva nesse cenário e a crescente demanda de biometano, o presente trabalho buscou projetar uma planta de remoção de CO₂ do biogás de aterro sanitário a partir do processo de separação de gases por membranas, transformando-o em biometano.

A escolha da tecnologia de separação de gases por membrana foi inspirada pelo *case* de sucesso da Gás Verde, que também utiliza essa tecnologia em sua instalação. O intuito é obter um produto com maior poder calorífico que o biogás bruto e tão eficiente quanto o gás natural ao ponto de poder utilizá-lo como substituto ou em conjunto com o GN nas suas diversas aplicações. Naturalmente, como consequência desse processo, são esperadas uma redução de emissões de metano, contribuindo a diminuição do efeito estufa, e ainda, um fomento para promover melhoria na qualidade de vida da população que reside no entorno dos aterros sanitários.

1.2. DELIMITAÇÃO

No presente trabalho foi realizado um projeto conceitual de uma planta de remoção de CO₂ do biogás por permeação em membrana gerado a partir da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos de um aterro sanitário real. O produto principal e de maior interesse formado é o biometano, além dele, também é formado um gás rico em CO₂.

É muito importante delimitar que o biogás considerado na alimentação do processo já passou por um pré-tratamento para retirada de outros componentes presentes que não fossem o CH₄ e nem o CO₂. A água, principalmente, foi totalmente removida do biogás, visto que a sua presença na etapa de permeação de gases poderia danificar a membrana. Vale ressaltar que o projeto não considerou o tratamento dos efluentes líquidos e gasosos gerados, bem como não contemplou análises de riscos e cálculos de investimento de capital inicial da planta.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

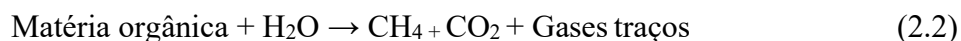
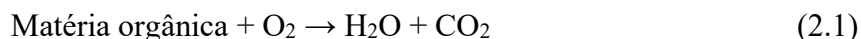
2.1. O BIOGÁS

Formado principalmente por metano e gás carbônico, o biogás tornou-se uma opção altamente considerada ao longo de anos de pesquisa como uma fonte potencial de energia renovável não intermitente, visto que, sua geração acontece de forma contínua, diferentemente de outras energias renováveis como a solar e a eólica. Essa vantagem confere a ele a possibilidade de mediar a inconstância na geração das outras fontes renováveis citadas. Além do mais, a utilização do biogás apresenta outros benefícios, como por exemplo, a “pegada negativa de carbono” já que além de ter baixa emissão de carbono, também reduz as emissões poluentes que seriam causadas pelos seus componentes caso não fosse aproveitado. Assim, o metano que iria ser descartado na natureza causando poluição, se transforma em uma fonte de energia oriunda de diferentes origens, como resíduos orgânicos da agropecuária, da indústria e do saneamento (aterros sanitários e tratamento de esgoto) de acordo com Milanez *et al.* (2018).

2.1.1. Características e Origem

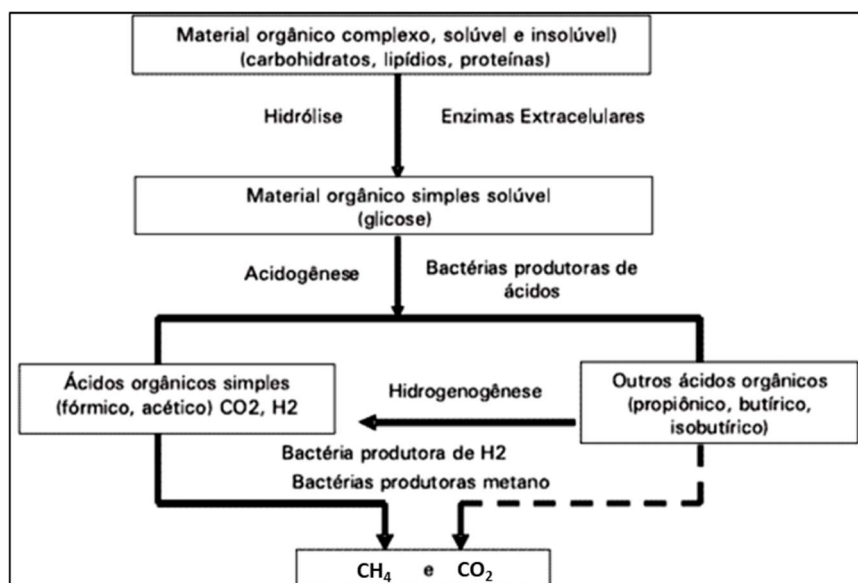
O biogás pode ser produzido em condições controladas, onde o processo de decomposição anaeróbica ocorre em biodigestores anaeróbicos, como por exemplo, reatores anaeróbicos de contato ou de membrana e lagoas anaeróbicas muito utilizadas em tratamento de efluentes (Lima e Santos, 2016). Entretanto, em aterros sanitários a decomposição não ocorre em sistema controlado, portanto, sua formação vai depender das condições do meio que podem ou não ser favoráveis.

Segundo Jucá (2021), o mecanismo de degradação (decomposição) da matéria orgânica em aterros se dá por dois caminhos: (1) em condições aeróbicas (presença de O_2) e outro (2) em condições anaeróbicas (sem a presença de O_2) e em reação com a água (H_2O). Conforme a reação (1) ocorre, vide equação (2.1), vai acarretando redução de oxigênio no meio, dando início a segunda reação, vide equação (2.2), que é a responsável pela geração de biogás por ação de bactérias anaeróbicas.



A formação do biogás ocorre em algumas etapas, a começar pela hidrólise, etapa onde enzimas extracelulares degradam carboidratos complexos, lipídios e proteínas em unidades menores. Em seguida, na etapa de fermentação ou acidogênese, essas partes menores são transformadas em ácidos orgânicos de cadeia curta e gases, sendo esses principalmente o hidrogênio e o dióxido de carbono. Algumas substâncias formadas na etapa de fermentação são convertidas em acetato, hidrogênio e CO_2 , esses são os substratos para a formação do metano e, a essa reação, dá-se o nome de acetogênese. Por fim, bactérias que estão mediando as reações bioquímicas esgotam o oxigênio residual e bactérias anaeróbicas metanogênicas são as responsáveis pela última etapa do processo, a metanogênese, em que os produtos da acetogênese são transformados em metano e dióxido de carbono (Bond e Templeton, 2011; Zenatti, 2023). A Figura 2.1 traz um esquema da sequência dessas reações.

FIGURA 2.1 – ETAPAS DA DECOMPOSIÇÃO ANAERÓBICA DE MATERIAIS ORGÂNICOS.



FONTE: Adaptado de Zenatti (2023).

Outros gases para além do metano e do gás carbônico o compõem, embora presentes em menor quantidade, como por exemplo, o sulfeto de hidrogênio (H_2S), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), compostos orgânicos voláteis (VOCs), entre outros (Chen *et al.*, 2015).

Contudo, o biogás pode apresentar composições diferentes a depender da sua matéria-prima de origem e das condições operacionais da decomposição anaeróbica (Chuah *et al.*, 2018; Ryckebosch *et al.*, 2011). A Tabela 2.1 traz uma comparação das composições do biogás produzido em biorreatores e do biogás produzido em aterros sanitários.

TABELA 2.1 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS E BIODIGESTORES.

Parâmetros	Unidade	Biodigestores	Aterros Sanitários
Metano	% (mol)	60 -70	35-65
Dióxido de carbono	% (mol)	30-40	15-40
Nitrogênio	% (mol)	≈ 0,2	15
Oxigênio	% (mol)	0	1
Hidrogênio	% (mol)	0	0-3
Hidrocarbonetos pesados	% (mol)	0	0
Vapor de água	% (mol)	≈ 6	≈ 6
Sulfeto de hidrogênio	mg/L	0 – 5000	0 - 100
Amônia	mg/L	≈ 100	≈ 5
Siloxano	-	Traços	traços

FONTE: Adaptado de Chuah *et al.* (2018); Sun *et al.* (2015).

A composição do biogás pode variar de acordo com a quantidade de resíduos, fatores climáticos que costumam não ser os mesmos para diferentes países e regiões (Seixas *et al.* 2014). Portanto, a tabela 2.2 traz a composição de biogás de aterro sanitário a partir de uma referência brasileira.

TABELA 2.2 – COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS.

Parâmetros	Unidade	Aterros Sanitários
Metano	% (mol)	45-55
Dióxido de carbono	% (mol)	35-50
Nitrogênio	% (mol)	0-10
Oxigênio	% (mol)	0-4
Vapor de água	% (mol)	2-4
Hidrogênio	% (mol)	<0,1
Monóxido de carbono	% (mol)	<0,1
Gás sulfídrico	% (mol)	<0,01

FONTE: Jucá (2021).

Os compostos ácidos e as impurezas presentes no biogás são corrosivos ou possuem potencial para produzir compostos corrosivos durante a combustão do biogás. É imprescindível

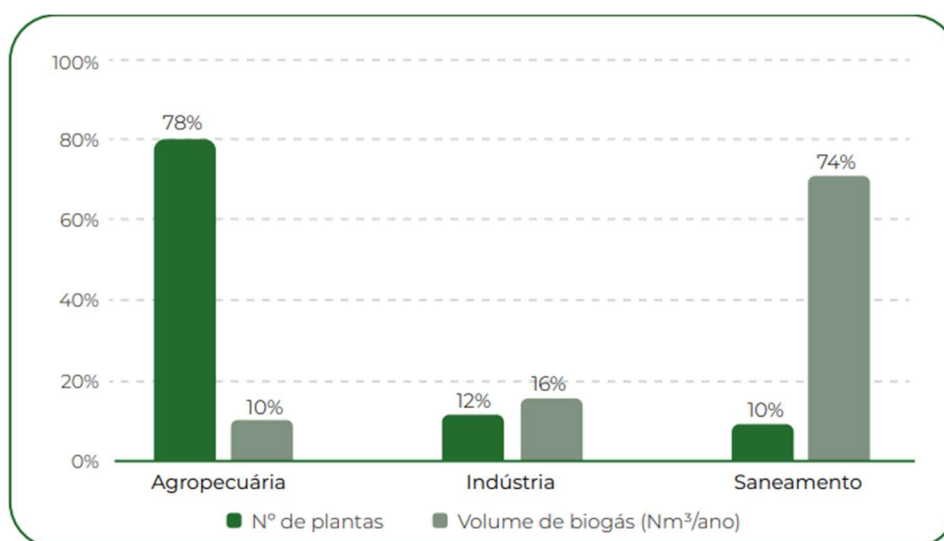
que esses compostos sejam removidos porque eles podem vir a afetar as partes metálicas de motores de combustão interna e tubulações por onde o biogás vai passar

Infere-se a partir da Tabela 2.1 que o maior controle da reação de decomposição e composição dos resíduos confere uma faixa de dióxido de carbono menor e uma quantidade de metano maior presentes no biogás produzido em biodigestores, sendo essa uma vantagem em relação ao biogás produzido em aterros.

O gráfico da Figura 2.2 revela que o setor de origem do biogás com maior número de plantas em 2022 era o da agropecuária, representando 78% do total de plantas. De acordo com Milanez *et al.* (2018), o biogás produzido no setor agropecuário também contribui para a segurança energética, pois reduz as dificuldades de suprir a demanda por energia elétrica em áreas rurais afastadas. Análises de custos (incluindo impostos e perdas de transmissão) apontam que o biogás produzido de maneira descentralizada em biodigestores advindo de atividades agropecuaristas, a depender de certas condições, dentre uma delas, pontua-se a escala de produção, pode ser mais econômico do que a energia fornecida pela rede pública para os usuários rurais.

Entretanto, de acordo com o gráfico da Figura 2.2, o setor que mais produziu biogás em volume (Nm^3/ano) foi o de saneamento com a parcela de 74% em relação ao volume total de todos os setores, mesmo apresentando o menor número de plantas. Com isso, infere-se que a área de saneamento é um setor com grande potencial em questões de capacidade de produção do biogás destacando-se os aterros sanitários.

FIGURA 2.2 – NÚMERO DE PLANTAS E VOLUME DE BIOGÁS PRODUZIDO POR SETOR NO BRASIL EM 2022.



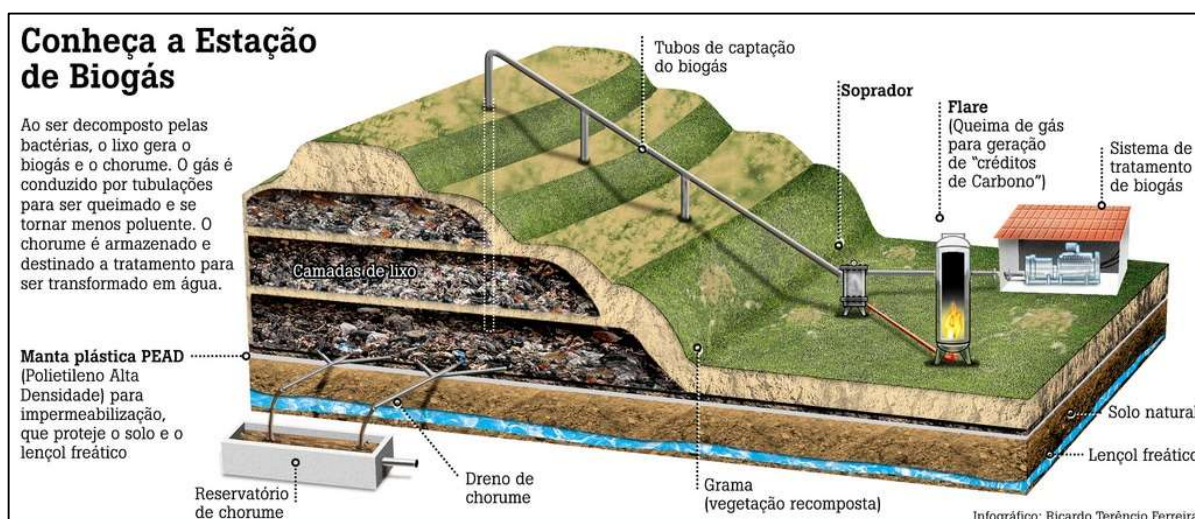
FONTE: CIBiogás (2022).

2.1.2. Aterros Sanitários

Conforme visto no tópico anterior, o setor de saneamento possui grande potencial para produção de biogás, sendo os aterros sanitários parte desse setor. Conforme ABNT NBR 8419:1992 (1992), o aterro sanitário é uma técnica de disposição de RSU no solo com o mínimo de impactos possíveis ao meio ambiente, à saúde e segurança pública. Para isso se faz uso de fundamentos de engenharia, que permitam compactar ao máximo esses resíduos, reduzindo seu volume, forrando-os com uma camada de terra ao final de cada dia de trabalho ou com maior frequência, se necessário.

Seu funcionamento se dá basicamente por uma base onde os resíduos vão sendo depositados e cobertos por camadas de argila, essa base conta com um sistema de drenagem de chorume. Ela deve estar em cima de uma camada impermeável de polietileno de alta densidade (PEAD) que fica acima de uma camada de solo compactado para evitar que haja vazamento de líquidos (incluindo chorume e água da chuva) para o solo e consequentemente para os lençóis freáticos. Em seu interior passa um sistema de drenagem de gases que possibilita a coleta do biogás que pode ser encaminhado para uma unidade de tratamento, entre outras destinações, como detalhado no Infográfico da Figura 2.3 (Vertown, 2024).

FIGURA 2.3 – INFOGRÁFICO DE UMA ESTAÇÃO DE CAPTAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO.

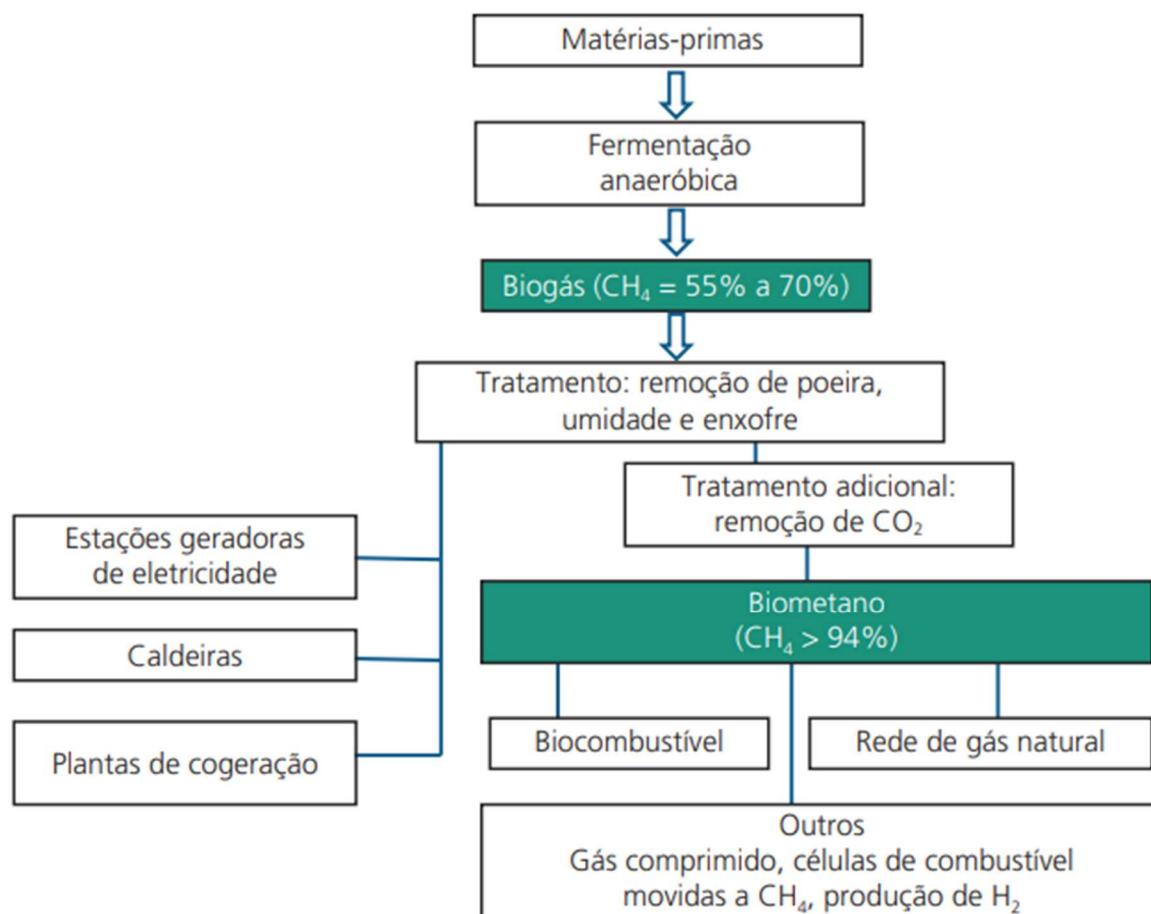


FONTE: Ferreira (2009).

2.1.3. Aplicações do Biogás

A Figura 2.4 apresenta os possíveis caminhos de conversão do biogás em energia. Após tratamento para retirada de umidade, poeira e H_2S , ele pode ir para estações de energia elétrica a fim de gerar eletricidade, também pode alimentar caldeiras a fim de gerar calor ou pode ser utilizado para alimentar turbinas e motores a gás em plantas de cogeração, produzindo calor e eletricidade de forma combinada. Quando transformado em biometano, após remoção do CO_2 , geram-se novas aplicações para esse gás, podendo ser utilizado na produção de biocombustível para veículos ou como complemento do gás natural para usos domésticos e industriais. Inclusive pode ser comprimido em cilindros de gás para uso doméstico e/ou para uso veicular, e utilizado em aplicações mais modernas, como conversão em hidrogênio e células a combustível movidas a metano (Raboni e Urbini, 2014). A Figura 2.5 apresenta uma das aplicações do biogás citadas, trata-se de uma planta de geração de energia elétrica que utiliza o biogás advindo direto de um aterro sanitário que pode ser visto ao fundo da imagem.

FIGURA 2.4 – APLICAÇÕES PARA CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA.



FONTE: Milanez et al. (2018) adaptado de Raboni e Urbini (2014).

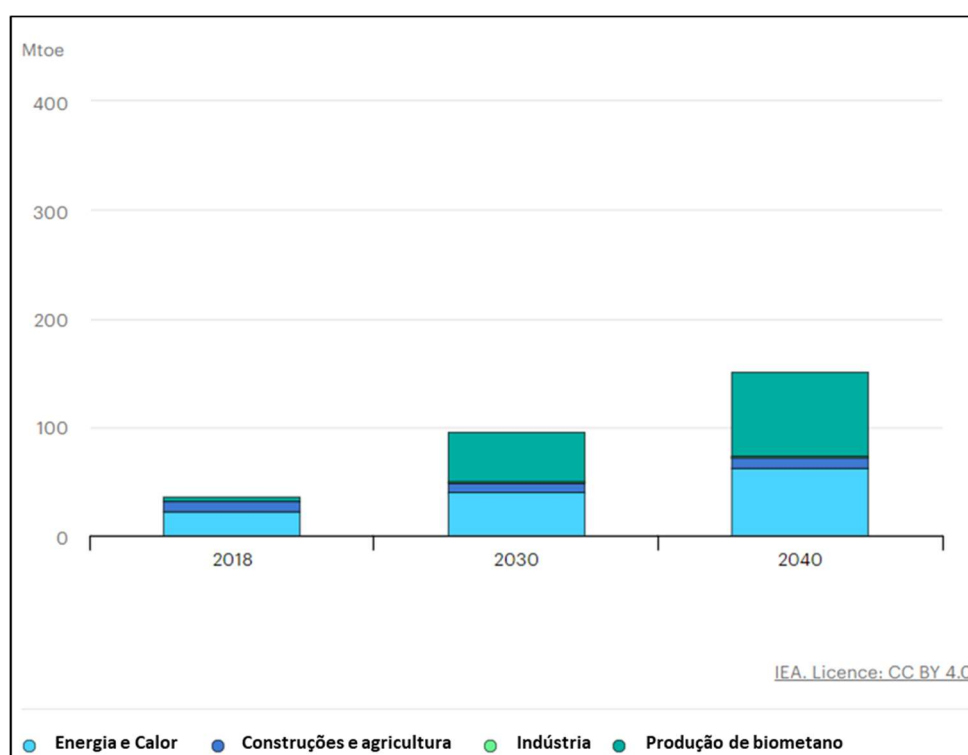
FIGURA 2.5 – USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO.



FONTE: Petronotícias (2019) *apud* Agostini (2019).

De acordo com o gráfico da Figura 2.6 disponibilizado por IEA (2020), o consumo global de biogás no cenário de Políticas Declaradas reflete um crescimento desde 2018 e a perspectiva é que esse consumo mais que dobre até 2040. Observa-se que as aplicações do biogás, ainda em 2018, eram basicamente voltada para geração de energia e calor, mas ao dar um olhar para o cenário futuro, a expectativa é que a produção de biometano possa vir a representar a maior parcela.

FIGURA 2.6 – PERSPECTIVAS PARA O CONSUMO GLOBAL DE BIOGÁS POR SETOR NO CENÁRIO DE POLÍTICAS DECLARADAS, 2018-2040.



FONTE: Adaptado de IEA (2020).

2.2. BIOMETANO

Conforme a Resolução nº 886/2022, o biometano é um “biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás” (Brasil, ANP, 2022). Uma vez que o biogás apresenta poder calorífico entre 4.500 e 6.000 kcal/m³, ele pode ser consumido diretamente, por exemplo, na geração de energia elétrica através de sua queima, como visto na Figura 2.4. Porém, para que apresente um poder calorífico próximo ao do GN é necessário que ele seja purificado por meio de processos de *upgrading* aumentando a concentração de metano e passando a ser chamado de biometano, cujo conteúdo energético é próximo ao do gás natural (EPE, 2018 *apud* Brasil, MME - EPE, 2022).

O biometano é equivalente e intercambiável com o gás natural e para misturá-los ou para comercializar apenas o biometano, no Brasil, sua qualidade deve atender às regulamentações específicas da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis no Brasil (Brasil, ANP, 2022).

A origem do biometano e do gás natural é o que mais difere esses gases, já que são compostos principalmente pela mesma molécula - o metano - entretanto, o gás natural contém outros hidrocarbonetos leves em sua composição que não são encontrados no biometano, como apresentado na Tabela 2.3, que compara as composições típicas do biometano e do gás natural.

TABELA 2.3 – COMPOSIÇÕES TÍPICAS DO BIOMETANO E DO GÁS NATURAL.

Constituintes	Gás Natural	Biometano
Metano	0,8931	0,9652
Etano	0,0600	-
Propano	0,0166	-
n-Butano	0,0038	-
i-Butano	0,0022	-
n-Pentano	0,0008	-
i-Pentano	0,0011	-
n-Hexano	0,0011	-
Nitrogênio	0,0070	0,0139
Dióxido de Carbono	0,0143	0,0199

FONTE: Sulgás e Ecocitrus (2014) *apud* Grabski (2015).

2.2.1. Tecnologias de Separação de CO₂/CH₄

Além do metano, a substância combustível, outros componentes formam o biogás bruto. Todos esses, por não trazerem benefícios ao aproveitamento energético, podem ter sua presença considerada indesejável no biogás. Das substâncias indesejadas, há as inertes, que apenas reduzem o poder calorífico do biogás, e as danosas, que podem causar problemas em tubulações e nos equipamentos, maior nível de emissões ou serem nocivas à saúde humana (Sun *et al.*, 2015). Dos elementos presentes em quaisquer combustíveis, o carbono e o hidrogênio são os que mais contribuem para um maior poder calorífico do combustível. Enquanto o oxigênio, geralmente presente nos combustíveis de origem vegetal, reduz o poder calorífico do combustível (Bizzo, 2005).

Devido à presença dessas substâncias indesejadas e também a qual finalidade o biogás se aplicará, é preciso tratá-lo para que ele obtenha a composição desejável para tal aplicação. Sendo assim, surgem algumas alternativas de tecnologias para limpar, ou seja, remover os componentes danosos e para *upgrading* do biogás que tem por objetivo retirar os componentes que diminuem seu poder calorífico, são elas: separação criogênica, absorção física, absorção química, *upgrading* in situ, métodos de *upgrading* biológico, membranas, adsorção por oscilação de pressão do inglês *Pressure Swing Adsorption* (PSA) e lavagem com água. Sendo essas duas últimas as mais populares, mas que nos últimos anos estão perdendo espaço para tecnologias recentes, como por exemplo, a lavagem com amina (Sun *et al.*, 2015). O Quadro 2.1 traz as principais tecnologias de separação de CO₂/CH₄ em comparação com a tecnologia de separação de gases por membranas.

QUADRO 2.1 – COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE SEPARAÇÃO DE CO₂/CH₄.

Parâmetros	Lavagem com água	Lavagem com amina	PSA	Separação de gases por membranas
Princípio de funcionamento	Lavagem física, maior solubilidade de CO ₂ em água do que CH ₄	Maior solubilidade de CO ₂ em água do que CH ₄ ; formação de ligações químicas reversíveis entre soluto e solvente	Interação física entre CO ₂ e adsorvente; adsorção a alta pressão/dessorção a baixa pressão	Barreira seletiva que separa o CO ₂ do CH ₄ (baseada na cinética e seletividade de sorção).
Pressão (bar)	4-7	Ambiente	4-7	7-20
Recuperação típica de CH ₄ (%)	95.0-99.0	>99.0	98.0	80.0-99.5

FONTE: Adaptado de Chuah *et al.*, 2018; Abiogás, 2022.

(CONTINUAÇÃO QUADRO 2.1) – COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE SEPARAÇÃO DE CO₂/CH₄.

Parâmetros	Lavagem com água	Lavagem com amina	PSA	Separação de gases por membranas
Material/solvente usado	Água	Soluções de amina, por exemplo, methyldiethanol-amine (MDEA)	Peneiras moleculares, por exemplo, carvão ativado, zeólitas e sílicas de gel	membranas poliméricas; membranas inorgânicas; membranas compostas; e membranas de transporte facilitado.
Vantagens	Baixo custo para altas taxas de remoção de CO ₂ em temperaturas mais baixas e operação estável alcançável com recirculação de água	Alta taxa de remoção de CO ₂ ; perda mínima de CH ₄ (<0,1%); e operação em condições ambientes é viável	Maximização da capacidade de adsorção de CO ₂ viável usando adsorventes de alta área superficial e alto enriquecimento de CH ₄	Perímetro da planta pequeno; baixos custos de capital; custos operacionais pode ser mais baixo dependendo do arranjo de módulos escolhido; alta densidade de empacotamento (grande área superficial da membrana por volume); e força motriz ajustável pela variação da pressão trans-membrana.
Limitação	Alta vazão de água necessária para a recirculação e regeneração efetiva da água e o CO ₂ é solúvel em água, resultando em corrosão da tubulação	Alta entrada de energia é necessária para dissolver CO ₂ da solução; é difícil otimizar a temperatura de operação (solubilidade vs taxa de reação); e alta temperatura de regeneração é necessária para evitar a absorção de H ₂ S (se presente)	A presença de H ₂ S pode induzir adsorção competitiva e irreversível; presença de H ₂ O pode reduzir a absorção de CO ₂ ; e processo intensivo em energia, pois a alta pressão é necessária para impulsionar a alta absorção de CO ₂	Contaminantes do gás de alimentação (por exemplo, H ₂ O e H ₂ S) podem reduzir a eficiência de separação; menor vida útil das membranas poliméricas em comparação com outras tecnologias; membranas poliméricas possuem limitações relacionadas a materiais (por exemplo, plastificação, relação permeabilidade-seletividade); e a compressão pode ser necessária para o gás de alimentação com baixa concentração de CO ₂ .

FONTE: Adaptado de Chuah *et al.*, 2018; Abiogás, 2022.

2.3. MEMBRANAS DE SEPARAÇÃO DE GASES

Por volta da metade da década de 1980, Cynara (Natco), Separex (UOP) e Grace Membrane Systems já vendiam membranas feitas de acetato de celulose para separar CO_2 do CH_4 no gás natural. Mais tarde, em 1994, a Medal (Air Liquide) disponibilizava seus módulos de membrana de fibra oca de poliimida. E um ano após, em 1995, a maior planta de membranas para processamento de gás natural (separação CO_2/CH_4) foi instalada no Paquistão utilizando módulos de membrana espiral (Chen *et al.* 2015).

O princípio do processo de separação de gases por membrana se dá pela membrana ser capaz de permitir que um determinado componente de uma mistura de gases permeie por ela, ao mesmo tempo que rejeita os outros componentes de maneira contínua, isso o torna um processo bastante atraente. Esse processo se baseia na dissolução e difusão do gás na membrana, em que, quando aplicada uma diferença de pressão em lados opostos da membrana o transporte desse gás ocorre através dela (permeação). Essa tecnologia se destaca das demais por ser fácil de operar, ter uma baixa necessidade de manutenção, e possuir um bom desempenho. Diferente de outras tecnologias de separação de gases, como por exemplo, separação criogênica ou por adsorção, a separação por membranas não envolve uma mudança de fase, outrossim, não são necessários aditivos químicos durante a separação, tornando-a mais benévola ao meio ambiente (Kundu, 2013; Chen *et.al*, 2015).

Conforme Abiogás (2022) ressalta, o processo de SGM ocorre no nível molecular dos gases, por isso se faz necessário um pré-tratamento do gás que passará pelas membranas para que haja a remoção completa de líquidos e partículas que possam bloquear os poros de permeação do CO_2 . A vida útil dessas membranas depende justamente da eficácia desse pré-tratamento podendo levar até mais de 15 anos operando continuamente.

No mercado de purificação do biogás destacam-se algumas empresas que atuam há um tempo nesse mercado fornecendo a tecnologia de separação de gases por membranas, são elas Air Liquide, Air Products, Evonik e Uber Corporation. Elas estão apresentadas no Quadro 2.2 junto com um resumo de suas atuações que vão além da experiência na área de remoção de CO_2 do biogás.

QUADRO 2.2 – FORNECEDORAS DE MEMBRANAS NO RAMO DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS.

Empresas	Resumo da atuação
Air Liquide	Fornecedor de membranas poliméricas de alta performance, equipamentos de purificação de biogás e liquefação de biometano ou gás natural. A Air Liquide também fornece gases de calibração de instrumentos e outros gases industriais (N ₂ , O ₂ , H ₂ , CO ₂ , Ar, etc.).
Air Products	Fabricante de membranas para purificação do biogás, produtora de gases industriais (N ₂ , O ₂ , Ar, H ₂ , CO ₂), gases especiais, gases de calibração, gases para laboratório. Integradora de tecnologias para soluções <i>onsite</i> , com operação e manutenção inclusas. Especialista na operação logística de distribuição de gases, e comercialização junto a empresas consumidoras.
Evonik	A Evonik é uma das líderes mundiais em especialidades químicas. A família de produtos SEPURAN® da Evonik inclui membrana para o refino do biogás, através da solução SEPURAN® Green. As vantagens do uso da tecnologia de membranas da Evonik para separação de gás podem ser resumidas na separação mais eficiente dos gases e no aumento da produtividade resultante do processo.
UBE Corporation	Empresa japonesa com mais de 120 anos de história e 40 anos de experiência em tecnologias de membranas de separação de gases. A UBE fabrica tecnologia altamente inovadora e eficiente de membranas para separação de CO ₂ /CH ₄ para utilização em processos de upgrade de biogás em biometano. O material da UBE possui alta resistência térmica, mecânica e química, podendo operar com até 3% de H ₂ S.

FONTE: Adaptado de Abiogás (2022).

2.3.1. Materiais de Membranas para Permeação de Gases

Segundo Chen *et al.* (2015), as membranas para separação de gases são, em sua maioria, a base de polímeros orgânicos. Embora existam membranas a base de materiais inorgânicos, essas não são tão utilizadas, visto que possuem propriedades mecânicas fracas e são difíceis de serem processadas, consequentemente, sua fabricação se torna mais cara, entre outras desvantagens que as acompanham. Já os polímeros são facilmente processados o que implica em módulos de membranas com alta área superficial aumentando sua capacidade de separação.

Dentre os vários polímeros orgânicos, destacam-se aqueles utilizados no setor industrial, são eles: o Acetato de Celulose (AC), a Polissulfona (PSf) e a Poliimida (PI).

Dentro do conjunto de polímeros orgânicos, há uma subdivisão entre os emborrachados e os vítreos. Por mais que os emborrachados tenham alta permeabilidade, a maioria dos processos industriais de separação de gases utiliza os vítreos devido à sua alta seletividade de gases (Bernardo *et al.*, 2009). Ainda de acordo com Chen *et al.* (2015), os polímeros vítreos acetato de celulose, poliimida e perfluoropolímero são tipicamente usados quando a preferência de componente a ser permeado for do CO₂ e a seletividade típica sobre o CH₄ para esses materiais costuma ser de 10 a 20 %. Para ele, os melhores materiais para remover CO₂ do biogás são os polímeros de poliimida. O Quadro 2.3 apresenta os principais materiais para membranas de separação de gases

QUADRO 2.3: PRINCIPAIS MATERIAIS PARA MEMBRANAS DE SEPARAÇÃO DE GASES.

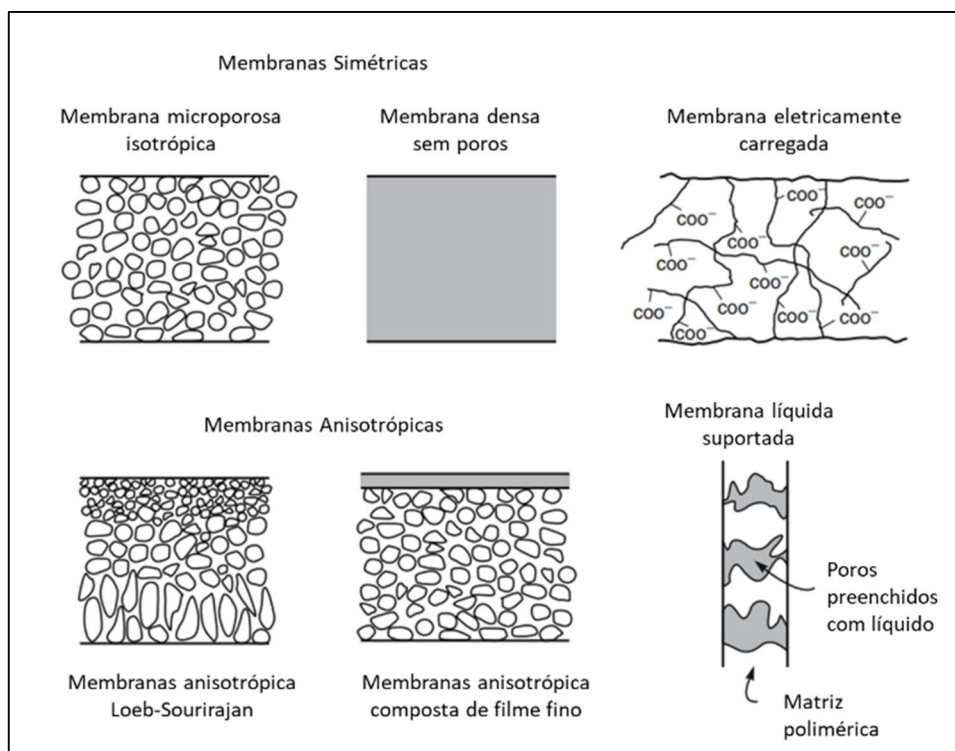
Polímeros Orgânicos	Materiais Inorgânicos
Polissulfona, polietersulfona	Peneiras moleculares de carbono
Acetato de celulose	Carbono nanoporoso
Poliimida, polieterimida	Zeólitas
Policarbonato (bromado)	Sílica amorfa ultramicroporosa
Óxido de polifenileno	Ligas de paládio
Polimetilpenteno	Perovskitas condutoras mistas
Polidimetilsiloxano	Estruturas orgânicas metálicas (MOFs)
Poliviniltrimetilsilano	

FONTE: Adaptado de Chen *et al.* (2015).

2.3.2. Morfologia de Membranas para Permeação de Gases

De acordo com Baker (2012), uma membrana nada mais é do que uma fina e discreta interface capaz de regular a permeação de espécies químicas em contato com ela. Se a interface tiver sua composição e estrutura uniformes, essa pode ser considerada homogênea a nível molecular. Caso ela contenha poros ou camadas em sua estrutura é chamada de heterogênea. Na Figura 2.7 estão representados os principais tipos de membrana.

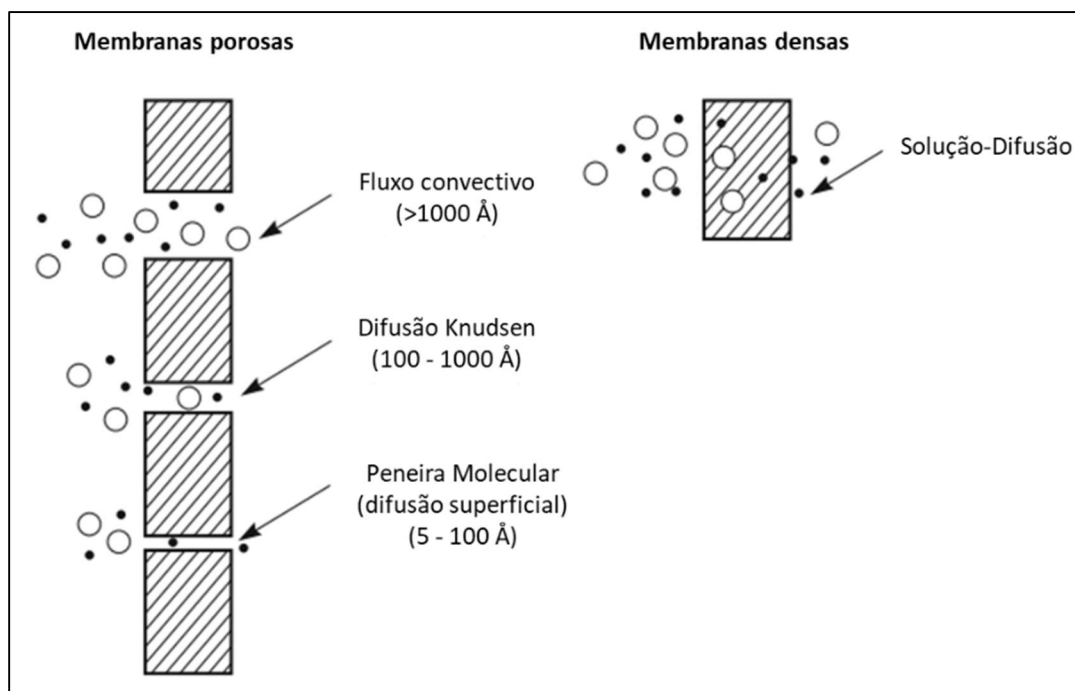
FIGURA 2.7 – PRINCIPAIS TIPOS DE MEMBRANA.



FONTE: Adaptado de Baker (2012).

Tanto membranas porosas como densas podem ser usadas no processo de SGM (Baker, 2012). A Figura 2.8 mostra três opções de membranas porosas variando o tamanho de seus poros superficiais e uma membrana densa (sem poros superficiais).

FIGURA 2.8 – MEMBRANAS POROSAS E DENSAS.



FONTE: Adaptado de Baker (2012).

O fluxo convectivo ocorre quando os poros possuem um tamanho relativamente maior entre 0,1 e 10 μm , nesse caso os gases atravessam a membrana sem que haja separação. Quando os poros variam entre 0,01 e 0,1 μm , seus diâmetros são menores que o caminho livre das moléculas, e a difusão nesse caso é regida pela difusão de Knudsen, cuja taxa de transporte do gás é inversamente proporcional a raiz quadrada da sua massa molar, dá-se o nome para essa relação de Lei de Difusão de Graham. Caso os poros sejam ainda menores, os gases são separados por peneiramento molecular, seu transporte tem uma certa complexidade e inclui tanto a difusão na fase gasosa quanto a difusão superficial, ou seja, difusão das moléculas adsorvidas nas superfícies dos poros (Baker, 2012).

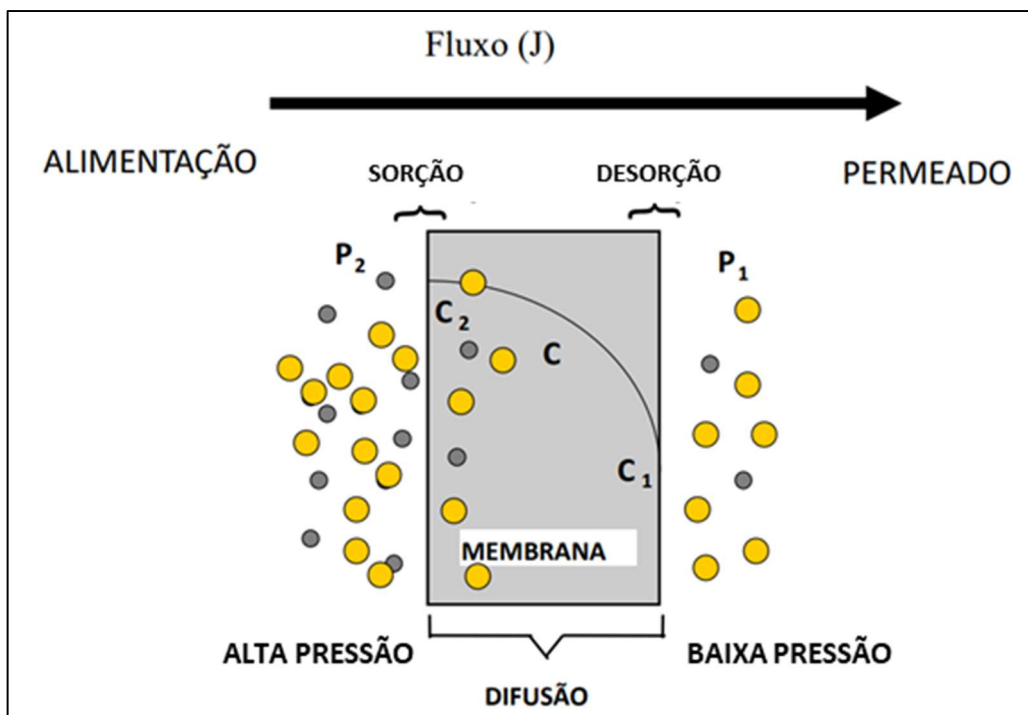
O fato é que essas membranas porosas não são muito usadas em grande escala, sendo as membranas poliméricas densas as mais empregadas na separação de gases e normalmente são incorporadas por uma estrutura anisotrópica a fim de melhorar o fluxo. Isto porque, na separação de gases por membranas é economicamente desejável se operar com altas taxas de transporte, porém quanto maior o fluxo de gás a ser transportado, menor deverá ser a espessura da membrana (ver equação (7)), mas há uma limitação na fabricação dessas membranas quanto a sua espessura mínima possível mantendo-a mecanicamente resistente e sem defeitos. Por isso, uma forma de superar essa limitação é através das membranas anisotrópicas, elas consistem em uma camada (pele) superficial densa e abaixo dela, há uma subcamada mais espessa e porosa. Na camada superficial são determinadas as propriedades de separação e a camada porosa funciona apenas como um suporte mecânico, o que possibilita altas taxas de transporte. Por essa razão, comercialmente essas membranas são as mais utilizadas (Baker, 2012).

2.3.3. Mecanismo de Transporte dos Gases

O mecanismo de transporte de um gás pela membrana depende das propriedades dela, como sua estrutura física e química. Depende também da natureza das espécies que a permeiam, podendo variar de acordo com o tamanho, a forma e a polaridade dessas espécies e da interação entre a membrana e o permeante (Kundu, 2013).

Conforme proposto por Graham o transporte de gases por meio de membranas poliméricas densas ocorre em três etapas: sorção, difusão e dessorção (Wijmans e Baker, 1995). Conforme representado na Figura 2.9.

FIGURA 2.9 – REPRESENTAÇÃO DO MECANISMO DE TRANSPORTE DE GASES POR MEMBRANAS POLIMÉRICAS DENSAS.



FONTE: Adaptado de Baker (2012).

A princípio o gás no lado de alta pressão da membrana se dissolve no filme polimérico (membrana), depois difunde-se para o lado de baixa pressão e, por fim, é dissolvido e liberado na extremidade de baixa pressão. É assumido que as etapas de sorção e dessorção nas interfaces são mais rápidas em comparação com a taxa de difusão no polímero e as fases gasosas em ambos os lados da membrana estão em equilíbrio com as interfaces poliméricas (Wijmans e Baker, 1995).

As moléculas do gás que permeiam a membrana (permeantes) são separadas uma das outras devido à diferença em suas solubilidades e difusividades na matriz polimérica. Elas são sorvidas pela membrana se tiverem alguma "afinidade química". Essas moléculas de gás sorvidas podem então se difundir (Chen *et al.*, 2015).

A etapa de difusão se dá pelo transporte dos gases de uma região para outra devido a um gradiente de concentração (Kundu, 2013). Sendo assim, tem-se que no estado estacionário, o fluxo de gás através da membrana pode ser descrito pela primeira lei de Fick (Chen *et al.*, 2015), apresentada na equação (2.3).

$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{dx} \quad (2.3)$$

Onde, D_i é o coeficiente de difusão do gás determinado pela mobilidade das moléculas de gás à medida que se difundem através do polímero (Chen *et al.*, 2015) e dC_i/dx é o gradiente de concentração, ou seja, é a variação de concentração do gás ao longo de uma distância x .

2.3.4. Permeabilidade e Seletividade

A lei Henry, de acordo com a equação (2.4), descreve a concentração do gás dissolvido na membrana (C_i) em função da pressão parcial desse gás (p_i) e do coeficiente de solubilidade (S) (Chen *et al.*, 2015) ou coeficiente de sorção como é chamado por Baker (2012).

$$C_i = S_i p_i \quad (2.4)$$

Ao introduzir a equação (2.4) na equação (2.3), em que, o Fluxo do gás passa a ser descrito como na equação (2.5).

$$J_i = D_i \frac{dS_i p_i}{dx} \quad (2.5)$$

De acordo com Baker (2012, p.66), “os coeficientes de sorção dos gases nos polímeros permanecem relativamente constantes porque, para uma aproximação razoável, a sorção nos polímeros se comporta como se os polímeros fossem fluidos ideais”. Desse modo a equação (2.6) surge a partir da resolução da equação (2.5), onde S é considerado constante então sai da derivada e, o caminho x considerado é a própria espessura da membrana (l).

$$J_i = D_i S_i \frac{(p_{i_0} - p_{i_l})}{l} \quad (2.6)$$

Por fim, o produto $D_i S_i$ pode ser reescrito como P_i , onde P_i é coeficiente de permeabilidade do gás (Chen *et al.*, 2015). Portanto, a permeabilidade ou em outras palavras, a capacidade do gás de passar através da membrana, é determinada por dois fatores: a parte termodinâmica ligada a quantidade de moléculas adsorvidas ou absorvidas pela membrana (S) e a parte cinética por parte do coeficiente de difusão (Chen *et al.*, 2015). Com isso, obtém-se a

equação do fluxo do gás em função da razão de sua permeabilidade e diferença de pressão nas extremidades da membrana em relação a espessura da membrana, vide equação (2.7).

$$J_i = P_i \frac{(p_{i_0} - p_{i_l})}{l} \quad (2.7)$$

Considerando que o fluxo (J_i) seja o fluxo molar do gás permeante, cuja unidade é expressa em $\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, ele pode ser reescrito como o quociente da vazão molar (Q) em mol/s e da área da membrana (A) em m^2 . Assim, rearranjando a equação (2.7) a fim de obter P_i deixando-o isolado na equação, tem-se a equação (2.8) para permeabilidade do gás permeante.

$$P_i = \frac{Q * l}{A * (p_{i_0} - p_{i_l})} \quad (2.8)$$

Chen *et al.* (2015) indica a seletividade como outra importante propriedade a ser considerada para membranas de separação de gases. Segundo Baker (2012), a seletividade é a habilidade que a membrana tem para separar dois gases e pode ser expressa em função da permeabilidade dos gases que desejasse separar, conforme equação (2.9).

$$\alpha_{ij} = \frac{P_i}{P_j} \quad (2.9)$$

Define-se por padrão que o gás mais permeável é tomado como i , de modo que $\alpha_{ij} > 1$ (Chen *et al.*, 2015). Então com a seletividade é possível ter uma ideia de quantas vezes a mais o gás que tem maior permeabilidade na membrana utilizada no processo irá ser permeado em relação ao outro.

2.3.5. Tipos de Módulos e Geometrias de Membranas para Permeação de Gases

Segundo Chen *et al.* (2015) para a separação de gases por membrana é necessária uma área superficial grande para que haja alta eficiência no processo. Ele destaca que três tipos de módulos são utilizados em aplicações industriais para separação de gases, são eles: fibra oca, espiral e envelope. O Quadro 2.4 apresenta uma breve comparação entre esses três tipos de módulos.

QUADRO 2.4 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE FIBRA OCA, ESPIRAL E ENVELOPE.

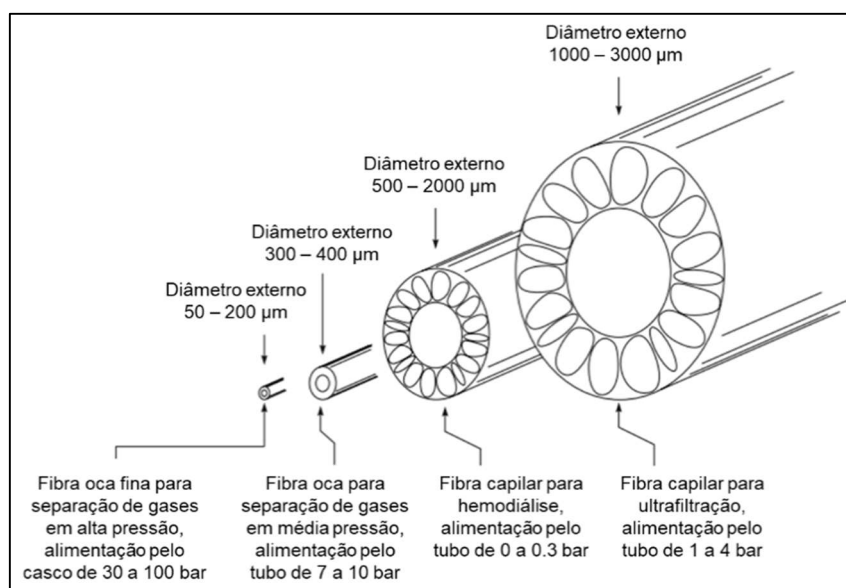
Propriedade	Unidade	Fibra oca	Espiral	Envelope
Densidade de empacotamento	m ² /m ³	<10000	200-1000	30-500
Área por módulo aproximadamente	m ²	300-600	20-40	5-20

FONTE: Adaptado de Chen et al. (2015).

Dentre os três, o módulo de envelope é o que apresenta menor densidade de empacotamento e menor área superficial por módulo, opta-se então pelos módulos de fibra oca e espiral. Sendo o módulo de fibra oca o que apresenta maior área efetiva por módulo e tem se tornado o que mais atrai interesse, mas não só por isso, sua modularidade e facilidade de manuseio e operação também são pontos de destaque. Dos fornecedores de membranas para separação de gases citados no Quadro 2.2, todos produzem membranas do tipo fibra oca e feitas de poliimida, exceto a *Air Products* que fornece de fibra oca, mas feita de polisulfona (Chen *et al.*, 2015). Os principais tipos de membranas de módulo contendo fibras ocas podem ser vistos na Figura 2.10.

O diâmetro externo das fibras ocas pode variar de 50 a 3000 µm a depender de sua aplicação. Na faixa de 50 a 200 µm é normalmente chamado de fibras ocas finas e as separações de gás de alta pressão geralmente precisam dessas fibras finas, visto que, elas aguentam pressões muito elevadas. Já para separações de gás de média a baixa pressão, o fluido geralmente entra por dentro da fibra, enquanto o permeado sai para a parte externa do casco. E nesse caso o diâmetro da fibra costuma ser maior que 200-500 µm e se caso forem superiores a 500 µm, essas fibras são chamadas de fibras capilares (Chen *et.al*, 2015).

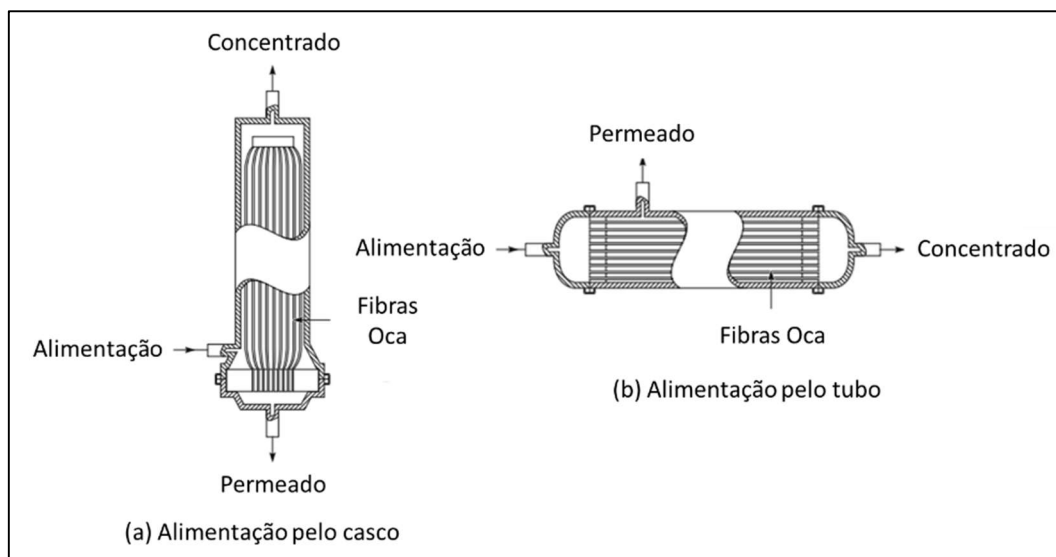
FIGURA 2.10 – PRINCIPAIS TIPOS DE MEMBRANAS DE MÓDULO FIBRA OCA.



FONTE: Adaptado de Baker (2012).

Existem duas geometrias básicas para membranas do tipo fibra oca, uma é a alimentação pelo casco e a outra é alimentação pelo tubo (fibra) (Baker, 2012). Na Figura 2.11 são apresentados os dois tipos de módulos de fibra oca quanto a alimentação da mistura utilizados na separação de gases.

FIGURA 2.11 – DOIS TIPOS DE MÓDULOS DE FIBRA OCA UTILIZADOS NA SEPARAÇÃO DE GASES.



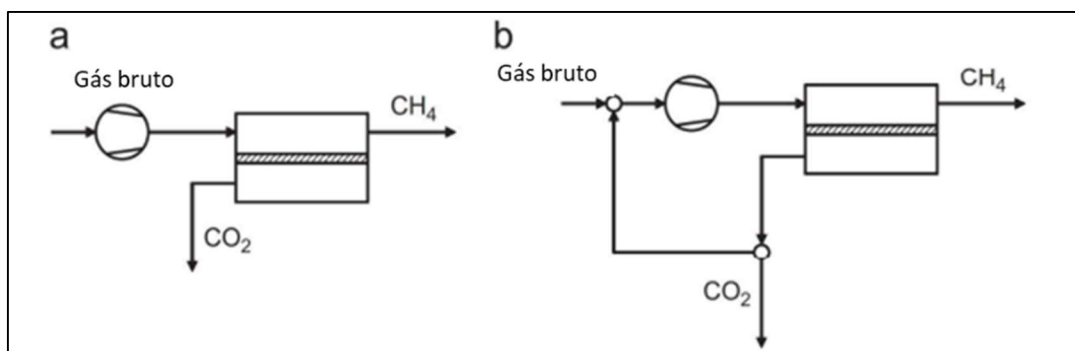
FONTE: Adaptado de Baker (2012).

Observa-se que no tipo (a) a alimentação ocorre pelo casco e o gás que permeia passa pela fibra e sai pela extremidade que se encontra aberta, enquanto o concentrado (retido) sai pelo casco na outra extremidade. Visto que a parede da fibra precisa suportar pressões altas, possui menor diâmetro e maior espessura. Já no tipo (b) a alimentação permeia de dentro da fibra para fora e o permeado sai pelo casco, enquanto o concentrado segue pela fibra até alcançar a sua outra extremidade que também está aberta. Nesse caso, para reduzir a queda de pressão no interior da fibra, aumentasse o seu diâmetro em relação ao das fibras usadas no tipo (a) (Baker, 2012).

2.3.6. Arranjos de Sistemas de Membranas para *Upgrading* do Biogás

Chen *et al.* (2015) apresenta alguns modelos de arranjos para sistemas de *upgrading* do biogás por membranas propostos por estudiosos, eles estão divididos em um único estágio, dois estágios e até três estágios. De acordo com a Figura 2.12, um único estágio pode apresentar a configuração mais simples possível (a) ou possuir um reciclo parcial do permeado (b).

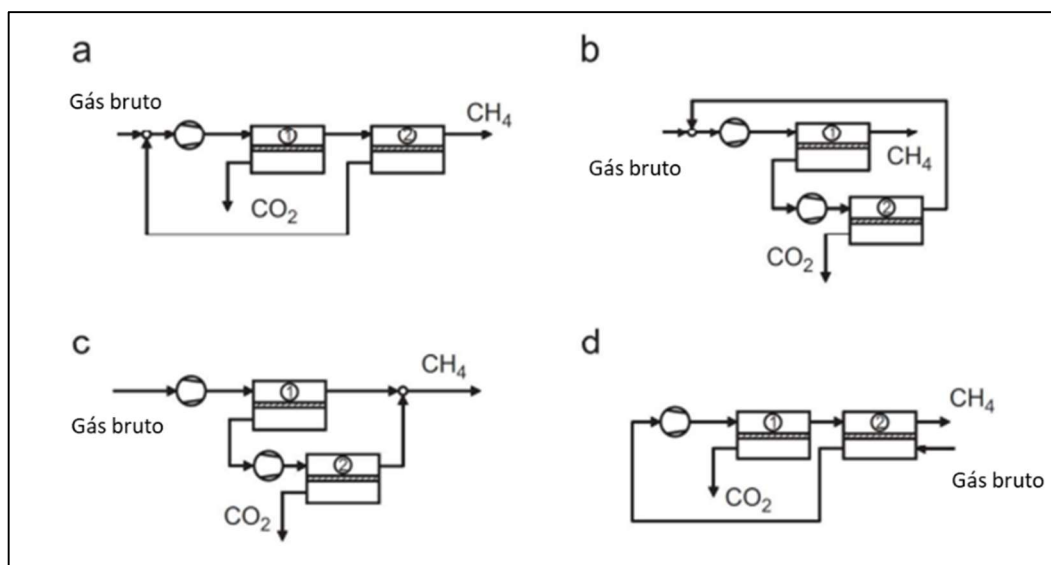
FIGURA 2.12 – ARRANJO DE UM ÚNICO ESTÁGIO.

FONTE: Adaptado de Chen *et al.* (2015).

O arranjo de configuração mais simples apresenta grande perda de metano na corrente de permeado (10-15%). Ao considerar um reciclo desse permeado, a recuperação não passa de 95% (Chen *et al.*, 2015).

Já a Figura 2.13 apresenta quatro possíveis arranjos de sistemas com dois estágios, onde a primeira tem-se o concentrado do primeiro alimentando o segundo estágio e o reciclo do permeado do segundo estágio (a). A segunda opção baseia-se no permeado do primeiro alimentando o segundo estágio e o reciclo do concentrado do segundo estágio (b). Na terceira tem-se permeado do primeiro alimentando o segundo estágio e o concentrado do segundo se juntando a corrente de concentrado do primeiro estágio (c). Por fim, na quarta possibilidade tem-se que a alimentação do primeiro é o reciclo do permeado do segundo estágio e o concentrado do primeiro estágio alimenta o segundo estágio (d).

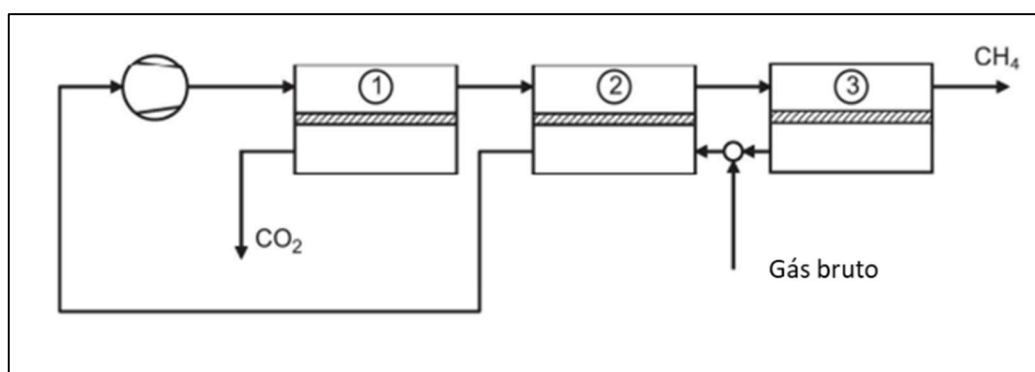
FIGURA 2.13 – ARRANJOS COM DOIS ESTÁGIOS.

FONTE: Adaptado de Chen *et al.* (2015).

Conforme avaliação de estudiosos o arranjo (b) da Figura 2.13 apresenta melhores resultados de recuperação de CH_4 , com menores custos e menos energia necessária para o processo. Seguido do arranjo (c) que apresenta menor área. O arranjo (d) é semelhante ao processo (a), a diferença é que no caso (d) considerasse que a fração molar de CO_2 no permeado do segundo estágio é maior do que a da corrente de alimentação, então uma corrente de varredura é aplicada para diminuir a fração molar de CO_2 no lado permeado do segundo estágio. Mesmo apresentando menores valores de recuperação de CH_4 , estes arranjos dependem apenas de um compressor (Chen *et al.*, 2015).

A Figura 2.14 mostra um único arranjo que conta com três estágios, onde a alimentação do gás é feita pela região por onde sai o permeado do segundo estágio, em seguida o permeado do segundo é quem alimenta o primeiro estágio, o concentrado do primeiro alimenta o segundo estágio e o concentrado do segundo alimenta o terceiro estágio.

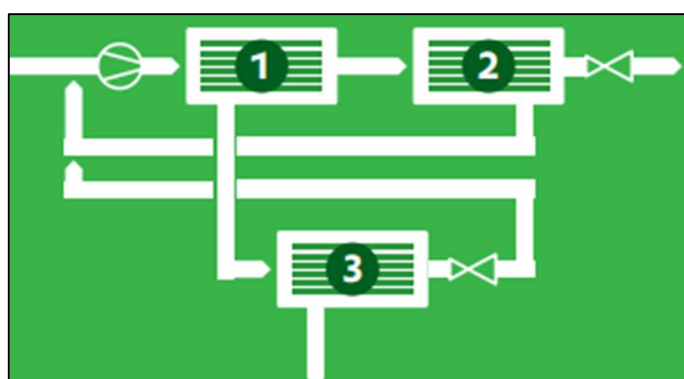
FIGURA 2.14 – ARRANJO TRÊS ESTÁGIOS.



FONTE: Adaptado de Chen *et al.* (2015).

Outra possível disposição para três estágios é apresentada pela SEPURAN® Green da Evonik® que possui um sistema com três estágios para separação de gases patenteado, apresentado na Figura 2.15.

FIGURA 2.15 – ARRANJO SEPURAN® GREEN DE UM SISTEMA COM TRÊS MEMBRANAS.



FONTE: Evonik (2023).

2.1. METODOLOGIA *FRONT-END-LOADING* (FEL)

A Metodologia FEL fundamenta-se em um processo de validação progressiva, ou seja, após a conclusão de cada estágio de desenvolvimento, o projeto é submetido a uma revisão (portões), onde são inspecionados os resultados obtidos. Com base nessa revisão, recomenda-se se o projeto deve avançar para a etapa seguinte (Romero *et al.*, 2010).

Mesmo sendo normalmente aplicada a projetos nas indústrias de mineração, petróleo, gás, entre outros, grandes projetos, no Brasil, há poucos estudos acadêmicos nessa área (Romero *et al.*, 2010). Uma boa parcela de profissionais que atuam na área de projetos não conhece essa metodologia. Uma hipótese para essa dificuldade de assimilação é o fato de o nome do método “*Front-End-Loading*” não ter uma tradução direta para a língua portuguesa. Ao tentar a tradução com maior aproximação para o português, divide-se o termo em duas partes: “Front-End” que dá a ideia de início do projeto, ou seja, sua fase de planejamento e “Loading” que pode ser traduzido como “Carga” pode se considerar como sendo definições, decisões e planos. Então, a tradução resulta-se em algo como “Carregar do Início”, ou seja, trazer para as fases iniciais do projeto as tomadas de decisões, investir o tempo nessas fases para executar ações que detalham melhor o projeto do princípio (Choma, 2022).

Comumente utilizada na indústria de refino de petróleo, o FEL pode ser referido em outros processos industriais como FED (*Front End Design*) ou FEED (*Front End Engineering Design*), todavia, o conceito geral da metodologia FEL para diferentes tipos de projetos é o mesmo. No entanto, as distribuições das suas atividades dentre as fases que o compõem podem variar de um projeto para o outro (Spangler, 2005).

Um exemplo da aplicação dessa metodologia pode ser visto em um projeto de engenharia de areias petrolíferas, onde para Jergeas (2008), as fases 1, 2 e 3 do ciclo de vida desse projeto são comumente considerados o *Front-End* do projeto. O Quadro 2.5 mostra esse ciclo de vida abordando os principais documentos gerados dentre essas fases, onde o PFD aparece como primeiro documento de engenharia a ser desenvolvido. Nele apresenta-se o sequenciamento lógico das reações do processo, assim como as vazões das correntes envolvidas. Essa é considerada uma etapa crítica que necessita de revisão e aceite por parte do proprietário da planta e a partir dele é possível iniciar a criação de documentos mais elaborados como o diagrama de tubulação e instrumentação do inglês *Piping & Instrumentation Diagram* (P&ID) contando com o auxílio técnico dos fornecedores dos equipamentos (Jergeas, 2008).

QUADRO 2.5 – CICLO DE VIDA DE UM PROJETO DE ENGENHARIA DE AREIAS PETROLÍFERAS.

Fase 1 Identificar e avaliar oportunidades	Fase 2 Gerar e selecionar alternativas	Fase 3 Desenvolver alternativa selecionada	Fase 4 Executar	Fase 5 Operar e Avaliar
PFD	P&ID	AFE	Projeto detalhado Aquisição Fabricação Construção	

FONTE: Adaptado de Jergeas (2008).

Para Spangler (2005), o FEL pode ser dividido em duas ou três fases, a Figura 2.16 ilustra uma linha do tempo típica de um processo FEL admitindo três fases. E o Quadro 2.6 traz as atividades/documentos que devem ser entregues por fase.

FIGURA 2.16 – DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E LINHA DO TEMPO DE EXECUÇÃO.



FONTE: Adaptado de Spangler (2005).

QUADRO 2.6 – ENTREGAS PADRÃO DO FEL.

Entregas	Fase		
	FEL 1	FEL 2	FEL 3
Documentos de escopo do projeto			
Descrição do projeto	X	X	X
Plano de execução do projeto		X	X
Documentos básicos do projeto			
Projeto básico do processo	X	X	X
Balanço de massa e energia		X	X
Resumo de utilidades		X	X
Resumo de emissões		X	X
Projeto Básico de Equipamentos		X	X
Projeto Básico de Linhas			X
Projeto Básico de Civil/Estrutural			X
Projeto Básico de Elétrica			X
Projeto Básico de Instrumentação e Controle			X

FONTE: Adaptado de Spangler (2005).

(CONTINUAÇÃO QUADRO 2.6) – ENTREGAS PADRÃO DO FEL.

Entregas	Fase		
	FEL 1	FEL 2	FEL 3
Projeto Básico de Proteção Contra Incêndio			X
Projeto Básico de Isolamento			X
Projeto Básico de Revestimentos Protetores			X
Estimativa Básica de custos	X	X	X
Desenhos-chave			
Diagrama de Blocos (BFD)	X		
Fluxograma de Processos (PFD)		X	X
Diagrama de Tubulação e Instrumentação (P&ID)			X
Diagramas Materiais de Construção			X
Plano do <i>Site</i>		X	X
Disposições Gerais		X	X
Desenhos de Linhas Unifilares			X
Diagramas Elétricos Unifilares			X
Especificações			
Equipamentos, tubulações, instrumentações, motores, isolantes			X
Listas/Resumos			
Lista de linhas			X
Lista de <i>Tie-ins</i>			X
Lista de Equipamentos		X	X
Lista de Instrumentos			X
Lista de I/O			X
Fichas Técnicas			
Ficha Técnica dos Processos		X	
Ficha Técnica dos Equipamentos			X
Ficha Técnica das Válvulas de Controle			X
Ficha Técnica das Válvulas de Alívio			X
Ficha Técnica de Instrumentações			X
Cronograma			
Cronograma geral	X	X	X
Estimativas			
Estimativa de Custo Fatorial	X		
Estimativa Preliminar		X	
Estimativa Definitiva			X
Relatórios de Definição do Projeto			
Relatório PDRI			X

FONTE: Adaptado de Spangler (2005).

Quanta (2016) também detalha bem o que deve ser produzido em cada fase, para ele o FEL 1 se destina a estudar a viabilidade técnica e econômica do projeto, já o FEL 2 visa a definição do escopo e especificações técnicas e por fim, o FEL 3 é a etapa final e mais

abrangente onde se prepara todos os documentos necessários para construção do projeto. O Quadro 2.7 apresenta os produtos que são entregues em cada fase.

QUADRO 2.7 – PRODUTOS ENTREGÁVEIS EM CADA FASE DO FEL.

FASES DO FEL	PRODUTOS ENTREGUES
FEL 1 – Estudo de Viabilidade	Projeto Preliminar de Processo: Definição das principais etapas do processo, fluxogramas e balanços de massa e energia. Layout da Planta: Desenvolvimento de um layout conceitual do local e arranjo de equipamentos. Lista de Equipamentos: Identificação dos principais equipamentos necessários para o projeto. Estimativa de Custos: Estimativa dos custos de capital e operacionais do projeto. Cronograma do Projeto: Criação de um cronograma preliminar para a execução do projeto. Avaliação Preliminar de Riscos: Identificação de potenciais riscos e estratégias de mitigação.
FEL 2 – Pré – FEED	Diagramas de Fluxo de Processo e Instrumentação (PFDs & P&IDs): Criação de diagramas de processo detalhados e especificação de requisitos de instrumentação. Simulação de Processo: Refinamento do projeto de processo utilizando sofisticados softwares de simulação. Especificações de Equipamentos: Desenvolvimento de especificações detalhadas para equipamentos maiores e menores. Projeto de tubulação: Completando um layout preliminar de tubulação e estimando materiais. Projeto Civil e Estrutural: Elaboração de anteprojetos para elementos civis e estruturais. Projeto Elétrico e de Instrumentação: Refinamento do projeto de sistemas elétricos e de instrumentação. Estimativa de Custo: Atualizando a estimativa de custo com maior precisão. Cronograma do projeto: Refinando o cronograma do projeto com um cronograma mais realista. Avaliação de Riscos: Realização de uma avaliação de risco mais aprofundada e desenvolvimento de planos de mitigação.
FEL 3 – FEED	Pacote de Projeto de Processo: Finalizando todos os desenhos, especificações e folhas de dados relacionados ao processo. Pacote de projeto de tubulação: Completando todos os desenhos de tubulação, especificações e desenhos isométricos. Pacote de Projeto Civil e Estrutural: Finalizando todos os desenhos e especificações civis e estruturais. Pacote de Projeto Elétrico e de Instrumentação: Finalizando todos os desenhos e especificações elétricas e de instrumentação. Decolagem de Materiais: Listagem de todos os materiais necessários para a construção. Preparação do Pacote de Licitações: Desenvolvimento de um pacote de propostas abrangente para empreiteiros. Estimativa de Custo: Refinar a estimativa de custo com um alto grau de precisão. Cronograma do Projeto: Finalizando o cronograma do projeto com um detalhamento das atividades.

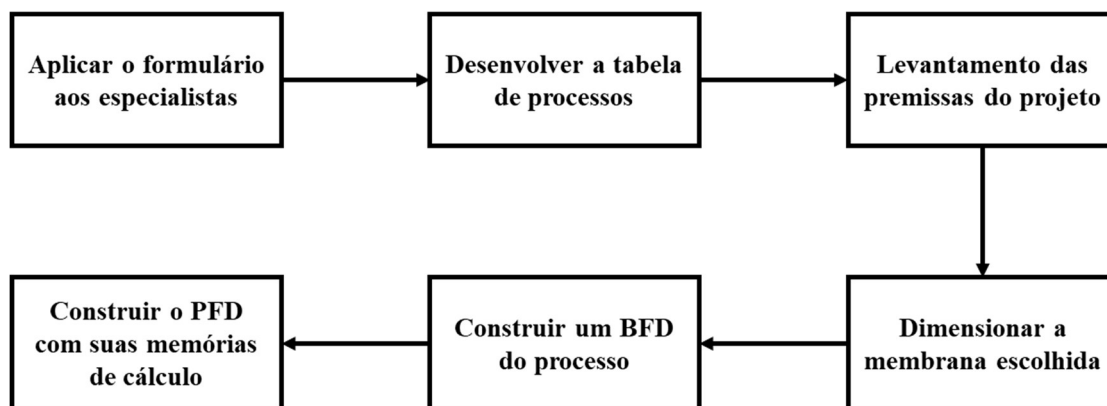
FONTE: Quanta (2016).

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1. METODOLOGIA FRONT-END-LOADING FASE 1 (FEL 1)

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi realizada uma pesquisa exploratória baseada na metodologia FEL, como visto previamente, essa metodologia se divide em três fases e possui uma grande quantidade de atividades a serem desenvolvidas. Para fins acadêmicos não há necessidade de concluir todas, portanto, o presente trabalho teve como foco a aplicação de alguns itens das fases de projeto conceitual (FEL 1) e de engenharia básica (FEL 2) de uma planta de remoção de CO₂ do biogás de aterro sanitário, que por sua vez abordou uma combinação de técnicas de coleta de dados. Uma delas foi a realização de um levantamento de campo a fim de entender melhor o processo e a outra foi a aplicação de um questionário a especialistas da área para ajudar na tomada de decisão sobre a membrana a ser utilizada no processo. O desenvolvimento do projeto se deu em seis macro etapas. É possível visualizar todas essas etapas através do diagrama de blocos apresentado na Figura 3.1.

FIGURA 3.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DAS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO CONCEITUAL.



FONTE: O autor (2024).

3.1.1 Técnica DELPHI

Para Bernardo *et al.* (2009), a seleção de uma membrana de separação de gases “depende de algumas propriedades físicas e químicas específicas, são elas: material (permeabilidade e

seletividade), estrutura e espessura da membrana (permeação), configuração da membrana (por exemplo, fibra plana e oca) e do módulo e arranjo do sistema também”.

Porém, devido à falta de padronização no mercado de membranas para esse tipo de matéria-prima, o passo seguinte foi utilizar uma ferramenta para obter a opinião de especialistas que atuam na área de tratamento de biogás e de membranas a fim de elucidar a tomada de decisão na escolha da configuração do módulo de membrana que seria utilizado no projeto.

Para isso, foi criado um questionário baseado na técnica *Delphi*. Essa técnica tem como propósito justamente ajudar na tomada de decisão por parte de um grupo de especialistas de algum tópico específico, onde por meio de formulários, cada participante mesmo que separados geograficamente podem opinar sobre o assunto. Algumas características desse método que o distingue de demais métodos com esse mesmo objetivo é a garantia de participação anônima, e a possibilidade de *feedback* e compartilhamento da análise estatística das respostas para os participantes (Osborne *et al.*, 2003). Isso faz com que as respostas dos especialistas não sofram influência dos demais, mas permita que haja uma troca de opiniões mesmo que de forma anônima, assim a tendência é que as respostas corroborem para uma resposta final com divergências mínimas.

Dessa forma, para aplicação do método a fim de obter as informações junto aos especialistas, foi utilizado um formulário online, o *Forms*, disponibilizado gratuitamente pela *Google*. O formulário foi encaminhado diretamente para especialistas que atuam ou possuem conhecimento prévio na área de tratamento de biogás e de membrana, garantindo seu total anonimato e fins acadêmicos.

Inicialmente foram criadas quatro perguntas e ao longo do projeto criou-se mais uma, então, ao todo foram elaboradas cinco perguntas sendo três de múltipla escolha e duas discursivas, em que a última questão era de caráter apenas elucidativo sobre o processo, ou seja, não era determinante para a seleção da membrana, por isso não era obrigatório ser respondida. As perguntas de 1 a 3 foram baseadas no que se encontra na literatura a respeito de membranas para permeação de gases e a quarta tinha por objetivo entender o que motivou a escolha feita na questão 1.

As perguntas e as suas respectivas opções de resposta estão contidas no Quadro 3.1, ressalta-se que o objetivo do método não é haver um consenso das respostas, mas sim, respostas de qualidade por parte de pessoas que entendem do assunto, respostas essas que agregam valor para a decisão final tomada (Gupta e Clarke, 1996).

QUADRO 3.1 – QUESTÕES PARA O MAPEAMENTO DAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE MÓDULOS DE MEMBRANA PARA REMOÇÃO DE CO₂ DO BIOGÁS.

PERGUNTAS	OPÇÕES DE RESPOSTA
1) Qual a melhor configuração de módulo de membrana para remoção de CO ₂ do biogás?	Fibra Oca (de dentro para fora)
	Fibra Oca (de fora para dentro)
	Espiral
	Outros (com direito a resposta discursiva)
2) Qual tipo de material da membrana utilizada?	Poliimida
	Acetato de Celulose
	Triacetato de Celulose
	Outros (com direito a resposta discursiva)
3) Qual a empresa fornecedora do módulo selecionado?	Air Liquide
	Evonik
	UBE Corporation
	Outros (com direito a resposta discursiva)
4) Baseado na resposta da questão acima, explique porque essa seria a melhor configuração em sua opinião.	Resposta discursiva
5) Você acredita que no futuro possa existir uma padronização dos tamanhos dos módulos de permeação para diferentes fornecedores?	Resposta discursiva

FONTE: O autor (2024).

3.1.2 Tabela de Processos

O primeiro documento concebido foi uma tabela de processos da permeação de gases por membranas, onde nela foram respondidas perguntas pertinentes ao processo que ajudaram a introduzir o projeto e torná-lo mais didático, facilitando seu entendimento.

Por se tratar do primeiro documento, seu preenchimento foi realizado com a devida atenção, pois seu sucesso poderia influenciar os demais documentos que o sucedem, e as suas informações foram prontamente alinhadas com referências bibliográficas do projeto em estudo.

3.1.3 Premissas do Projeto

Uma adaptação do projeto de uma planta de produção de biometano a partir de biogás de um aterro sanitário serviu como base para as premissas das memórias de cálculo do projeto em estudo. Assim como também, algumas considerações foram estabelecidas com base na literatura. Todas as predefinições foram compiladas e apresentadas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – PARÂMETROS PRÉ-DEFINIDOS NO PROCESSO DE SGM.

Parâmetros	1º estágio	2º estágio
Vazão volumétrica de alimentação	12.000 m ³ /h	8.000 m ³ /h
Vazão volumétrica do permeado	4.000 m ³ /h	4.000 m ³ /h
Temperatura da corrente	45 °C	45 °C
Pressão do concentrado	14 bar	13,5 bar
Pressão do permeado	0,5 bar	0,5 bar
Condição termodinâmica das membranas	Adiabática	Adiabática
Composição no concentrado ¹	85% de CH ₄ e 10% de CO ₂	97,2% de CH ₄ , 1,0% de CO ₂ , 1,42% de N ₂ e 0,38% de O ₂
Composição no permeado	2,3% de CH ₄ e 84% de CO ₂	Valores calculados

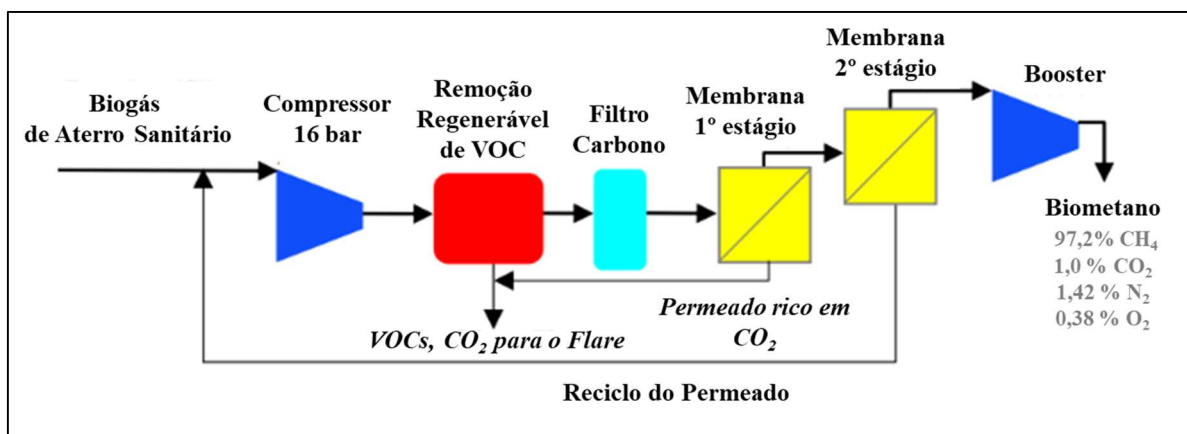
FONTE: O autor (2024); Air Liquide (2024).

NOTA 1: Composição considerando a recuperação de CH₄ como se houvesse apenas um estágio.

O arranjo do sistema escolhido e a composição do biometano foram escolhidos de acordo com Air Liquide (2024), que apresenta uma unidade de purificação do biogás contendo um sistema de membranas MEDALTM disposto em dois estágios, onde o concentrado do primeiro estágio alimenta o segundo, e o permeado do segundo é reciclado, como pode ser visto na Figura 3.3. Esse arranjo com dois estágios é semelhante ao desenho (a) encontrado no exemplo da Figura 2.13. Ressalta-se que apenas a informação da disposição em dois estágios de membranas agregou ao projeto, visto que, as demais operações como a remoção de compostos orgânicos voláteis (VOCs), o filtro carbono e a compressão do biometano produzido não faziam parte do escopo. Além disso, as porcentagens molares de CH₄ e CO₂ presentes no biometano também foram baseadas nesta referência.

Portanto, buscou-se projetar um processo de SGM no qual a fração de cada componente do biogás se mantivesse dentro das suas respectivas faixas de acordo com a literatura e para o biometano que estivesse dentro daquilo que determina a resolução vigente da ANP para sua qualidade, conforme apresentado no Anexo A.

FIGURA 3.3 – ESQUEMA DA UNIDADE DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS.



FONTE: Adaptado de Air Liquide (2024).

Com a configuração do módulo de membrana, seu material e o arranjo do processo definidos, a tabela do processo de SGM respondida e as premissas estabelecidas, já havia insumos suficientes para construir o diagrama de blocos e realizar o balanço de massa preliminar do processo, etapa seguinte do projeto.

3.1.4 Block Fluxogram Diagram (BFD)

A ideia de construir um diagrama de blocos foi traçada a fim de utilizá-lo de base para desenvolver as próximas etapas do projeto e, além disso, junto com ele foi apresentado o balanço de massa preliminar desenvolvido numa planilha do *software Excel 2016* (Microsoft Excel, 2016), isso possibilitou uma melhor didática para o projeto.

Para a criação do BFD foi utilizado o *software Draw.io* (Draw.io, 2023). Trata-se de um editor gráfico gratuito e *online* que também possui sua versão *desktop*, mas para o presente projeto optou-se pela versão *online*. A Figura 3.4 apresenta o modelo de folha de rosto utilizado para o BFD no *software*.

A maior região em branco da folha é chamada de área gráfica, nela deve ser desenhada a representação macroscópica do processo e é onde a tabela com o balanço de massa preliminar deve ser disposto. No canto direito da folha, de cima para baixo, estão identificadas as áreas de: “Documentos de Referência” que traz as informações de referências utilizadas para montagem do desenho; “Simbologia” que indica os símbolos utilizados na área gráfica visando o desenho ser autoexplicativo; “Revisão” que indica a rastreabilidade do desenho identificando quem o

executou, quem o revisou e quem o aprovou, e em que datas; “Títulos” que apresenta os campos de identificação do projeto. Por fim, a borda numerada do desenho é chamada de área de grid, que tem a função de localizar com maior facilidade os operadores presentes na área gráfica pelo seu quadrante de localização.

FIGURA 3.4 – MODELO DE FOLHA DE ROSTO BFD.

	A	B	C	D	E				
1					DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	1			
								SIMBOLOGIA	
2									2
3									3
4									4
					EXEC. DATA APROVA DATA REV				
					CLIENTE:				
					NOME DO PROJETO:				
5					Nº DO DESENHO	REV			
					TÍTULO:				
					ESC.: Sem Escala	FORM.: A3 29,7 cm x 42 cm			
	A	B	C	D	E	FOLHA: 1 de 1			

FONTE: O autor (2024).

3.1.5 *Process Flow Diagram (PFD)*

A última etapa se dá pela construção de um PFD, o documento chave deste projeto, nele foram representados os equipamentos e correntes antes não vistas no BFD, além do balanço de massa final e de energia do processo.

Ele foi construído no mesmo programa onde o BFD também foi elaborado, o *Draw.io*, e em comparação com o modelo de folha de rosto do BFD houve algumas alterações, como a adição de um campo para listar os equipamentos com suas TAGs e capacidades, um campo

para notas gerais, além disso, entrou mais uma coluna na área de revisão que foi a de aprovador do desenho e sua respectiva data de aprovação.

3.1.5.1 Balanço de Massa e Energia

A memória de cálculo do balanço de massa final também foi realizada numa planilha *Excel*, a diferença para o preliminar é que esse balanço abrangeu mais correntes e nele apareceu também as vazões molares.

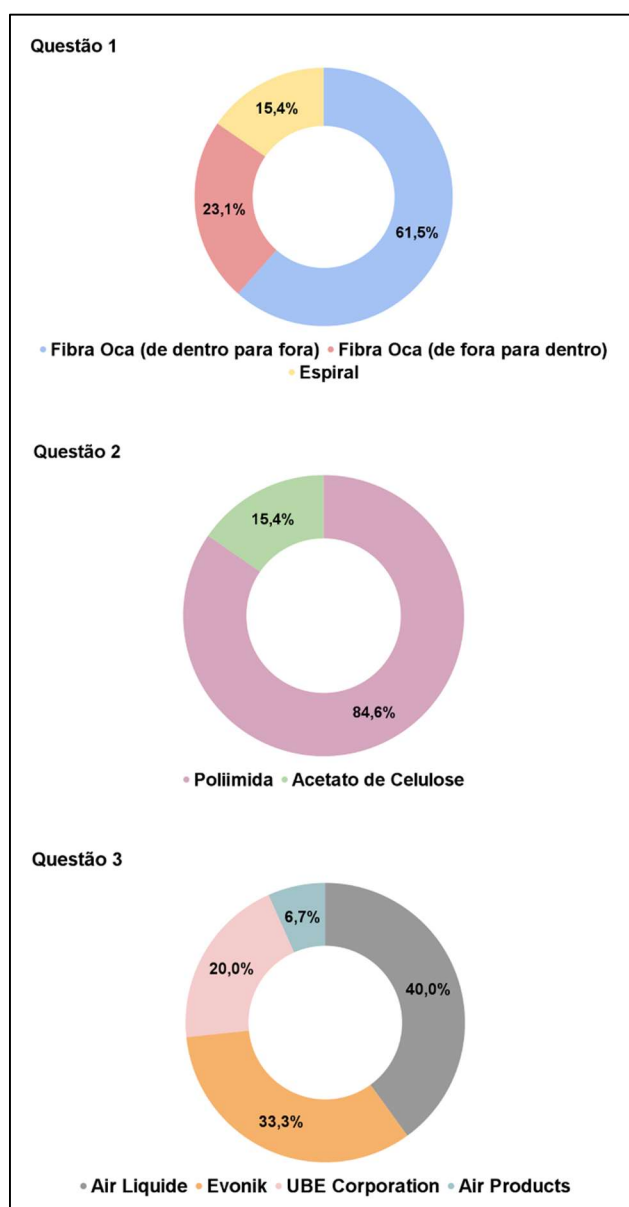
Já o balanço de energia foi encontrado através da simulação do processo no *software Aspen Plus*[®] versão 11 (*Aspen Plus*[®], 2019), onde foi possível obter o trabalho realizado pelos compressores e o calor (energia) transferido pelos trocadores de calor (*aircoolers*) necessário para comprimir e resfriar o biogás antes de adentrar o sistema de membranas, respectivamente.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MEMBRANA SELECIONADA

Ao todo 11 participantes responderam ao formulário e as respostas finais das questões de múltipla-escolha foram tratadas numa planilha *Excel* e transformadas em gráficos representados na Figura 4.1. Enquanto, as respostas finais das questões discursivas 04 e 05 estão contidas nos Apêndices A e B respectivamente, mas serão discutidas ainda nesse tópico.

FIGURA 4.1 – GRÁFICO DAS RESPOSTAS DAS QUESTÕES 01, 02 E 03.



FONTE: Autor (2024).

A questão 01 teve na sua totalidade 13 respostas, visto que, um único participante poderia escolher mais de uma opção como resposta se achasse cabível. As opções de fibra oca formaram a maioria, com mais de 80% do total. Dentre as membranas de fibra oca, aquela que tem o fluxo de gás de dentro para fora foi a mais optada com 61,5%, em seguida, a de fibra oca com fluxo de fora para dentro teve uma parcela de 23,1% e não muito atrás dela, veio a opção de módulo espiral com 15,4%.

A questão 02 também chegou ao número de 13 respostas, sendo quase uma unanimidade a opção da poliimida como material ideal de membrana para a separação de CO₂/CH₄, com uma parcela de 84,6%. O único outro material a ter sido mencionado além dela foi o acetato de celulose com 15,4% das respostas. A poliimida apresenta uma vantagem na separação desses dois componentes, visto que, a seletividade desse material pelo CO₂ é muito maior do que pelo CH₄, algo em torno de 32,5 a 42,8 a depender da temperatura (Basu *et al.*, 2010; Baker, 2012).

Já a questão 03 contou com 15 respostas e foi, dentre as três primeiras questões, a que possuiu maior equilíbrio nas respostas. Com 40%, a Air Liquide saiu na frente dentre as opções de fabricantes de membranas para remoção de CO₂, seguida da Evonik com 33,3% e da UBE Corporation com 20%. Por fim, a Air Products apareceu com 6,7% das escolhas feitas pelos participantes.

A questão 04 tinha por objetivo obter a justificativa para a resposta dada na questão 01 que pedia a opinião sobre a configuração da membrana. De acordo com as respostas, pode-se perceber que alguns fatores influenciaram as escolhas, por exemplo, para a fibra oca com fluxo de gás de dentro para fora, os participantes pontuaram as seguintes vantagens: possui maior densidade de empacotamento, maior recuperação do CH₄, maiores capacidades de alta pureza, modularidade, baixo custo de energia, alta seletividade e maiores resistências mecânica e à altas pressões, menor espaço ocupado pela planta, módulos com elevadas áreas o que acarreta no barateamento do custo de produção e redução de gastos com tubulações e válvulas para o equipamento, alimentação diretamente na camada seletiva da membrana e parte interna da membrana no compartimento de maior perda de carga.

Quanto à escolha da fibra oca com fluxo de fora para dentro, foram pontuados: melhores seletividade, resistência mecânica e densidade de empacotamento. Ademais justificou-se também por operar em baixa pressão com maior área/volume (densidade de empacotamento), alta estabilidade química e térmica em ambiente com traços de H₂S e NH₃. Essa última não se

aplicaria ao projeto, visto que foi considerado que o biogás foi pré-tratado antes de permear a membrana, e que não haveria nada de H_2S e NH_3 em sua composição.

Para as escolhas direcionadas para o módulo espiral, as justificativas foram: possuir maior resistência a altas pressões e suportar condições mais extremas do que as condições encontradas na alimentação de biogás.

As respostas da questão 05 eram apenas de caráter elucidativo sobre o futuro da padronização do tamanho dos módulos para diferentes fornecedores, ou seja, caso um cliente queira trocar o tipo de módulo de sua membrana, por exemplo, de espiral para fibra oca, ele teria a possibilidade de intercambiar o cartucho de fibra oca no módulo espiral. Para isso basta que o tamanho seja o mesmo para ambos, mas hoje, não é assim que funciona para módulos de permeação de biogás.

As respostas obtidas mostram duas fortes opiniões opostas quanto a essa questão, enquanto alguns acreditam totalmente ou parcialmente (talvez) nessa padronização em breve, assim como ocorreu com os módulos para permeação de GN e para os módulos de osmose inversa e nanofiltração, outros não possuem essa mesma esperança. A dificuldade, segundo os participantes, seria por parte dos fornecedores que não iriam ser a favor dessa padronização para não correrem o risco de suas tecnologias perderem espaço no mercado. No entanto, ficou evidente que para o cliente essa padronização seria ideal e ajudaria a reduzir custos.

A partir da análise das respostas obtidas foi levantado em paralelo o que havia de informações na literatura a respeito das questões discutidas, a fim de averiguar se as respostas estavam dentro do esperado e confirmou-se que sim, estavam alinhadas. Com isso, levando em consideração as premissas do projeto, o que há de informação disponível na literatura e com as respostas do formulário, a opção que melhor se encaixou para o projeto foi a membrana de fibra oca (de dentro para fora) feita do material polimérico poliimida.

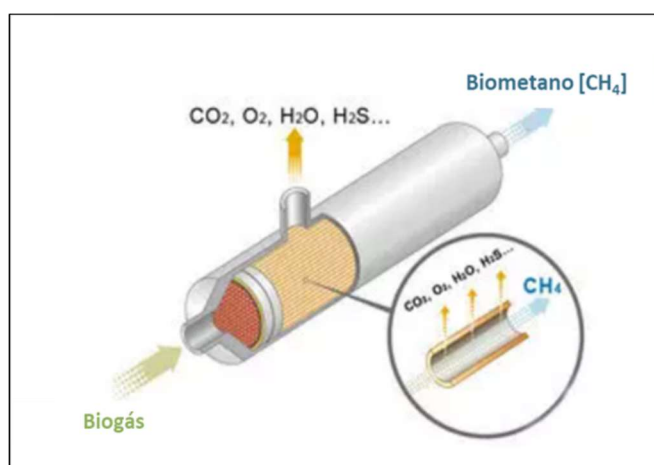
Como dito anteriormente, há uma falta de padronização no mercado de membranas de separações de gases quando se trata do biogás, portanto, para dimensionar a membrana era necessário ter informações específicas que não são as mesmas para membranas de diferentes fornecedores, como por exemplo, a capacidade da membrana em termos de vazão volumétrica, a diferença de pressão suportada, entre outras.

Dentre as opções de fornecedores do tipo da membrana escolhida, optou-se pela membrana da MedalTM – Air Liquide[©] (ver Figura 4.2) como referência para as memórias de

cálculos, visto que, ela é própria para o tratamento de biogás (Air Liquide, 2023b). E seu módulo é de fibra oca assimétrica à base de poliimida (Air Liquide, 2016). Conforme visto nos tópicos 2.3.1 e 2.3.2 essa combinação é a mais recomendada para o processo de SGM.

Além de atender as características e de ter se sobressaído frente as respostas obtidas na questão 03 do formulário em comparação com as outras fabricantes existentes no mercado, foi dela que mais se encontrou dados disponíveis com livre acesso sobre a sua tecnologia para tratamento de biogás por permeação de gases por membranas.

FIGURA 4.2 – DESENHO GRÁFICO DO MÓDULO DE MEMBRANA SELECIONADA.



FONTE: Air Liquide (2023a).

Observa-se pela Figura 4.2 que o biogás é alimentando de dentro para fora, o que corrobora o uso dessa configuração para operações a pressões moderadas, conforme visto no tópico 2.3.5. Ademais, de acordo com Air Liquide (2023a), seus sistemas de purificação de biogás tratam vazões de 50 a 10.000 pés cúbicos padrões por minutos (SCFM) que equivale a uma faixa de vazão de aproximadamente 87 a 17.500 m³/h, estando a vazão de alimentação de biogás do projeto dentro dessa faixa (12.000 m³/h). Além disso, ela é capaz de lidar com uma variedade de fontes do biogás incluindo o que vem de aterro sanitário, e é capaz de gerar um biometano com teor de CH₄ entre 96,5% e 99%, a depender da sua finalidade, incluindo projetos cuja recuperação de metano varia entre 95% e 99,5%.

4.2 TABELA DE PROCESSOS

Após o preenchimento da tabela do processo de SGM como mostrado na Figura 4.3, o processo projetado ficou mais transparente. Antes de preenchê-la, poderia haver certas dúvidas

sobre o processo que surgiriam mais à frente, e consequentemente, iriam travar o andamento do projeto, portanto, foi de suma importância ter essa visibilidade antes de dar início na construção dos outros documentos, evitando que houvesse retrabalhos.

FIGURA 4.3 – TABELA DE PROCESSOS DA SGM PREENCHIDA.

Nome da Operação Unitária	Separação de gases por membranas	
Aplicada para?	Separar o CO ₂ do biogás de aterro sanitário	
Operação unitária de separação ou reação?	Separação	
Princípio de Funcionamento?	Consiste em alimentar uma mistura gasosa em um módulo de permeação, no qual parte do gás permeia e parte é retida pela membrana.	
Força motriz?	Diferença de pressão.	
Remove ou degrada o que?	Remove o CO ₂ do biogás	
Quais os solutos que deseja-se após a reação ou separação permaneça no fluido de saída da operação unitária?	Biogás contendo o mínimo possível de CO ₂ em sua composição,e com uma concetração de CH ₄ maior do que a de entrada	
A operação unitária pode ser aplicada até que limite de concentração mínima dos solutos presentes?	> 20%. Porém se for preciso é possível adaptar uma membrana para atender concentrações menores.	
A operação unitária pode ser aplicada até que limite de concentração máxima dos solutos presentes?	<50%. No geral, a concentração de CO ₂ no biogás de aterro não passa de 50%, mas se for necessário é possível projetar uma mebrana para atender maiores concentrações.	
Qual a eficiência típica da operação unitária? - eficiencia é em termos da alteração de concentração deseja	95 - 99,5%	
Qual a recuperação típica da operação unitária? - recuperação é em termos da relação de vazões de entrada e saída da operação unitária.	80 - 95%	
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da operação unitária?	Área de seção transversal da membrana (geometria) e vazão de alimentação	
Quais as principais variáveis que devem ser monitoradas e controladas na operação unitária?	Monitoramento da vazão de alimentação e do concentrado e controle de pressão e temperatura	
Quais as técnicas analíticas que melhor representam as composições dos fluidos da operação unitária?	Cromatografia gasosa na saída do concentrado	
Quais são as malhas de controle principais da operação unitária?	Controle de pressão na saída do concentrado	
Caso existam, quais são as malhas de intertravamento necessárias na operação unitária?	Intertravamento por pressão, temperatura e por detecção de vazamento de gás	
Apresentar os equacionamentos principais para dimensionamento da operação unitária.	$\text{Área do Módulo} = \pi \cdot D_{\text{interno}} \cdot L_{\text{fibra}} \qquad N^{\circ} \text{ de Módulos} = \frac{\text{Área Total}}{\text{Área do Módulo}}$ $\text{Área Total} = \frac{\text{Vazão molar}_{\text{CO}_2 \text{ permeado}} \cdot \text{Espessura}_{\text{fibra}}}{\text{Permeabilidade}_{\text{CO}_2} \cdot \text{Pressão}}$ $\text{Volume do Módulo} = \pi \cdot \frac{D_{\text{módulo}}^2}{4} \cdot L_{\text{módulo}} \qquad \text{Espessura da Fibra} = \frac{D_{\text{externa}} - D_{\text{in}}}{2}$ $\text{Densidade de Empacotamneto do Módulo} = \frac{\text{Área do Módulo}}{\text{Volume do Módulo}}$	
Operação contínua ou em batelada? Manual ou automatizada?	Contínua e automatizada	
Para operação contínua, deve ser previsto mais de um trem operando? Quantos serão escolhidos? Com que capacidade?	Não. Como não há necessidade de limpeza das membranas, optou-se por um trem com 100% da capacidade necessária da planta.	
Qual a operação principal da operação unitária em estudo?	Separação de gases por membranas	
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Biogás
	Saídas	Biometano e Gás rico em CO ₂
Na operação unitária existe operação secundária ou de limpeza? Quais?	Não	
Quais as correntes da operação unitária presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	Não Aplicável
	Saídas	Não Aplicável
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?	Sim	
Quais as correntes da operação unitária presentes na operação não contínua? ou de limpeza?	Entradas	Não Aplicável
	Saídas	Purga
Quais os produtos químicos utilizados na operação principal?	Não Aplicável	
Quais as concentrações desses produtos químicos?	Não Aplicável	
Quais os produtos químicos utilizados na operação secundária ou de	Não Aplicável	
Quais as concentrações desses produtos químicos?	Não Aplicável	
Alguma outra informações que considere relevante ser destacada?	Não Aplicável	

FONTE: O autor (2024).

As perguntas iniciais como para o que se aplica, princípio de funcionamento até quais solutos desejasse manter são perguntas básicas sobre o processo, mas que ajudam defini-lo. A partir das perguntas sobre as concentrações dos solutos até a linha de equacionamentos para

dimensionar o equipamento houve a necessidade de uma pesquisa bibliográfica mais aprofundada, são questionamentos que ajudam a entender os limites operacionais do processo, seu desempenho operacional, o que deve ser controlado e monitorado e o que é preciso de informações e dados para dimensionar o equipamento. As equações principais para dimensionamento com uma melhor resolução serão apresentadas e aplicadas no tópico 4.6. Por fim, as questões em diante tinham por objetivo esclarecer como o processo estaria operando, quais as correntes presentes, incluindo correntes para limpeza do equipamento.

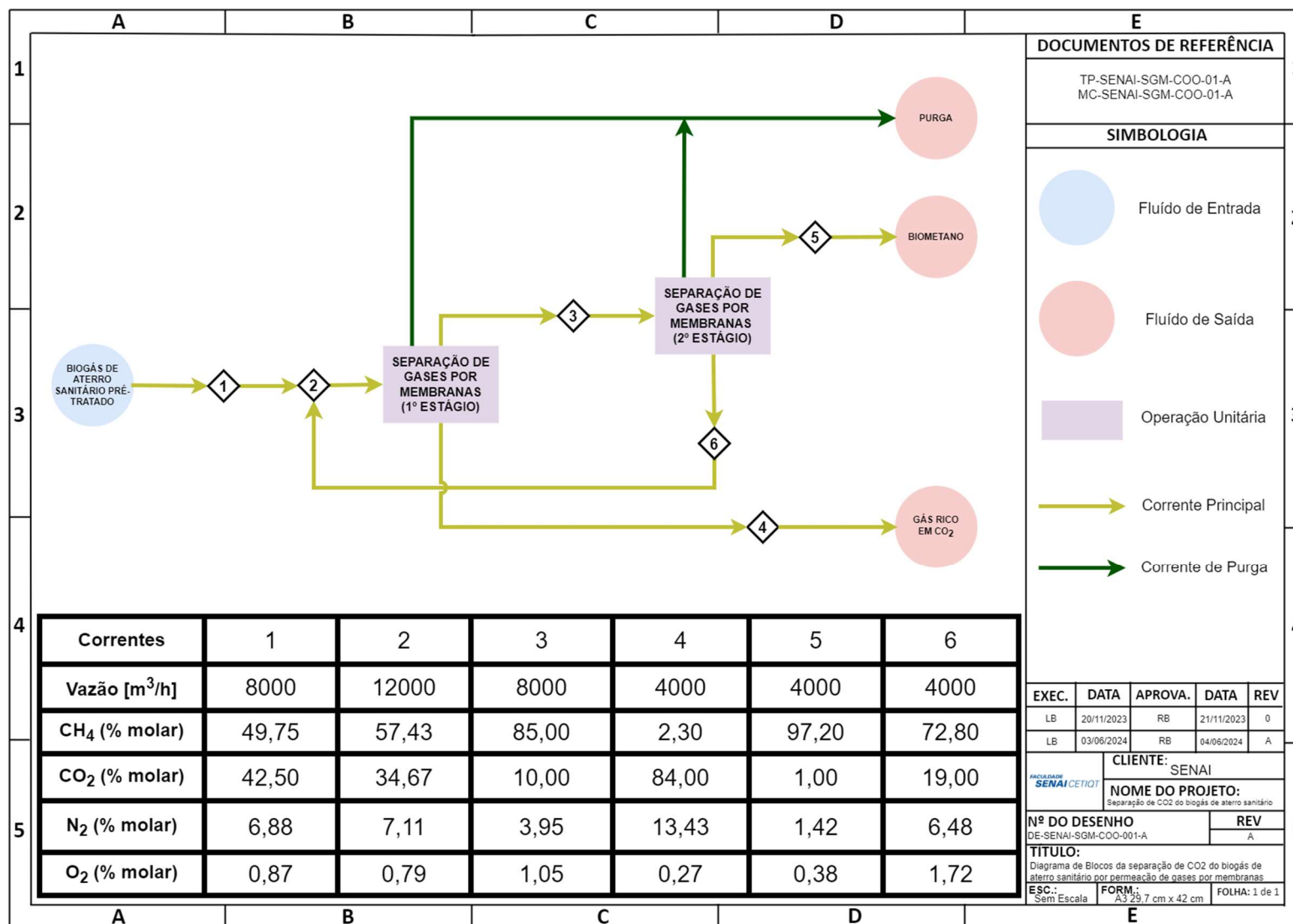
Evidentemente as respostas da tabela estão dispostas de forma célere, justificado pelo objetivo apenas acadêmico. Para fins de projetos reais haveria necessidade de uma maior gama de respostas com maiores explicações. As respostas geradas não só ajudaram a entender o processo o qual estava se trabalhando, mas também, levantou informações relevantes para o balanço de massa preliminar, auxiliou na organização das equações principais para o dimensionamento da membrana que estão dispostas no Capítulo 4.6 do presente trabalho, além de ter ajudado na escolha dos instrumentos de medição e controle do processo e ser um suporte para a construção do diagrama de blocos.

4.3 *BLOCK FLUXOGRAM DIAGRAM (BFD)*

Parte-se das premissas de projeto que o processo de *upgrading* do biogás através da separação de gases por membranas ocorreu em dois estágios, conforme visto na Figura 4.4 que mostra o BFD do processo de SGM. Através dele já foi possível observar, mesmo que de forma preliminar, como deveria se comportar o processo.

No canto direito da folha, especificamente na área de revisões, constam as revisões 0 (primeira emissão) e A (última). A primeira versão foi criada durante a realização de um trabalho da Unidade Curricular (UC) de Operações Unitárias III. Mais tarde, esse trabalho foi intitulado como Uso da Metodologia PBL na Disciplina de Operações Unitárias Visando Elaborar um Projeto Conceitual da Planta de Separação por Membranas de CO₂ do Biogás de Aterro Sanitário. E foi submetido e aprovado na modalidade Trabalho completo, para apresentação no evento IV Web Encontro Nacional de Engenharia Química (WENDEQ) a ser realizado entre os dias 08 e 12 de julho de 2024. Além do BFD, a tabela de processos e a memória de cálculo do balanço de massa preliminar também fizeram parte deste trabalho.

FIGURA 4.4 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO DE SGM CONTENDO O BALANÇO DE MASSA PRELIMINAR.



FONTE: O autor (2024).

Nessa área também constam os documentos de referências para o BFD que foram a tabela de processos (TP-SENAI-SGM-COO-01-A) e a memória de cálculo do balanço de massa preliminar (MC-SENAI-SGM-COO-01-A). Quanto a simbologia, para representar os fluidos utilizou-se círculos, que são tipicamente usados, diferenciando o fluido de entrada e os de saída por cores diferentes. As correntes também representadas pelas setas foram diferenciadas pelas cores. Na área do título destacasse o número do desenho já atualizado conforme última revisão.

Na área gráfica começando pelo desenho do diagrama de blocos propriamente dito, destacam-se cinco correntes que fazem parte da corrente principal do processo. A corrente (1) representa o biogás pré-tratado que se junta a corrente de reciclo (6) resultando na corrente (2). Essa corrente alimentou o primeiro estágio de membranas e se dividiu nas correntes de permeado (4), contendo basicamente um gás rico em CO_2 , e a corrente de concentrado (3). Essa corrente 3 foi encaminhada para o segundo estágio com uma concentração de CH_4 que já era relativamente alta, mas poderia ser ainda maior passando por outro estágio. Então a corrente de concentrado (5) saiu com uma alta concentração de CH_4 passando a ser chamado de biometano (produto desejado). Enquanto a corrente de permeado (6) foi reciclada para se juntar ao biogás bruto, visto que em sua composição ainda havia uma alta concentração de CH_4 .

Em seguida, para o balanço de massa preliminar pontua-se que as vazões de alimentação e permeado dos dois estágios já haviam sido pré-definidas, e consequentemente as vazões de concentrado para ambos também. Assim, para o balanço preliminar ficar completo só faltava encontrar a vazão de biogás que estava entrando. Como foi estabelecido que a vazão de entrada no primeiro estágio era de $12.000 \text{ m}^3/\text{h}$ e o reciclo do segundo estágio era de $4.000 \text{ m}^3/\text{h}$, a vazão da corrente de biogás só podia ser $8.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Logo, com todas as vazões calculadas e partindo das composições pré-definidas foi possível encontrar suas respectivas composições.

A composição do biometano já havia sido pré-definida para ficar dentro do que a ANP exige (vide Anexo A), onde a porcentagem molar de CH_4 foi maior que 90%, do CO_2 foi menor que 3% e a soma das porcentagens de CO_2 , N_2 e O_2 deram menos que 10%. Além disso, as composições de CH_4 e CO_2 da corrente (4) também haviam sido estabelecidas, conforme apresentado na Tabela 3.1. Então para obter esses valores de composição foi preciso manipular as demais composições de outras correntes que estarão mais detalhadas no tópico 4.5.

Quanto a composição do biogás, todos os componentes ficaram dentro de suas faixas de porcentagem molar, onde o CH_4 , cuja porcentagem requerida era entre 40 e 55% e obteve-se 49,75%. Para o CO_2 , que tinha como porcentagem requerida algo entre 35 e 50%, ficou com

42,50%. Para os demais componentes, N₂ e O₂, requeria-se que não passassem de 20% juntos, sendo a soma das suas porcentagens encontradas de 7,75%.

4.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO

Para a simulação ser executada foi preciso informar os seus dados de entrada que estão descritos no Tabela 4.1 e a simulação propriamente dita pode ser vista na Figura 4.5.

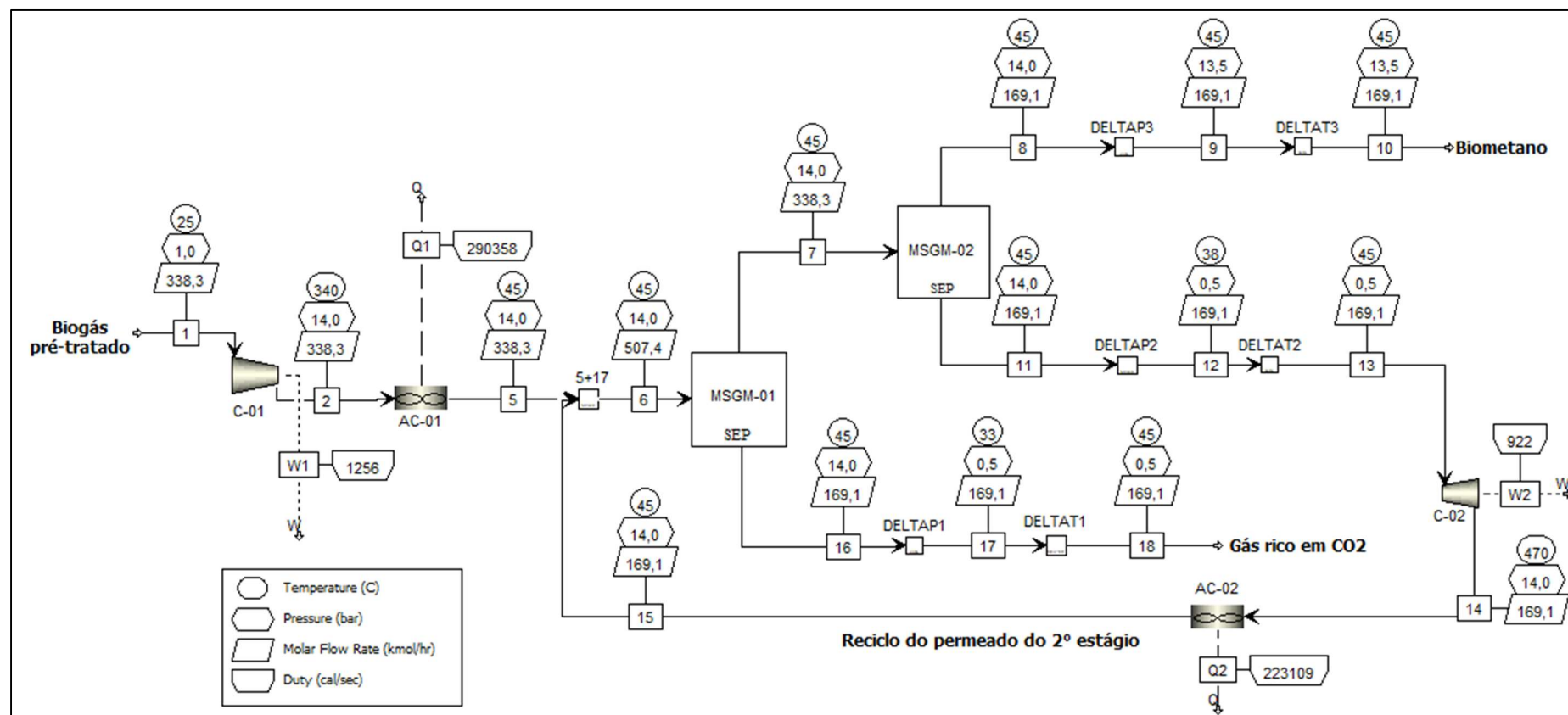
TABELA 4.1 – DADOS DE ENTRADA PARA SIMULAR O PROCESSO DE SGM NO ASPEN PLUS®.

Correntes / Equipamentos	Informações de Entrada	Dados
Entrada do Compressor (1)	Vazão molar de biogás ¹	338,3 kmol/h
	Composição molar de biogás	Ver Figura 4.2
	Temperatura	25 °C
	Pressão	1 bar
Compressor (C-01)	Tipo de Compressor	Isentrópico
	Pressão de descarga	14 bar
Compressor (C-02)	Tipo de Compressor	Isentrópico
	Pressão de descarga	14 bar
Air Cooler (AC-01)	Temperatura de saída do biogás	45 °C
	Pressão de saída do biogás	14 bar
Air Cooler (AC-02)	Temperatura de saída do biogás	45 °C
	Pressão de saída do biogás	14 bar
SEP (MSGM-01)	Vazões molares de cada componente em uma das correntes	Ver Figura 4.2
SEP (MSGM-02)	Vazões molares de cada componente em uma das correntes	Ver Figura 4.2
Mixers (DELTAP1) e (DELTAP2)	Pressão	0,5 bar
Mixer (DELTAP3)	Pressão	13,5 bar
Heater (DELTAT1) e (DELTAT2)	Temperatura	45 °C
	Pressão	0,5 bar
Heater (DELTAT3)	Temperatura	45 °C
	Pressão	13,5 bar

FONTE: O autor (2024).

NOTA 1: Valor encontrado a partir da vazão volumétrica que consta no balanço de massa disposto no BFD (ver Figura 4.2).

FIGURA 4.5 – SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE GASES DO BIOGÁS POR MEMBRANA NO *ASPEN PLUS*®.



FONTE: O autor (2024).

Os resultados do balanço de energia a partir da simulação de SGM realizada se encontram na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SGM NO *ASPEN PLUS®*.

Formas de Obtenção	Parâmetros	Valores	Unidades
W1	Trabalho realizado pelo compressor C-01	1,25618	MW
W2	Trabalho realizado pelo compressor C-02	0,82725	MW
W1+W2	Trabalho Global do processo	2,08343	MW
Q1	Calor transferido no aircooler AC-01	4.376,41	MJ/h
Q2	Calor transferido no aircooler AC-02	3.362,8	MJ/h
Q1+Q2	Calor Global do processo	7.739,21	MJ/h

FONTE: O autor (2024).

Vale ressaltar que as eficiências isentrópicas e mecânica dos compressores (C-01 e C-02) não foram informadas na entrada, pois optou-se por deixar para o simulador trabalhar com suas eficiências padrões que resultaram em uma eficiência isentrópica de 72% e uma eficiência mecânica de 100% para ambos os compressores. As vazões de ar que entraram pelos *air coolers* não precisaram ser informadas, o simulador mesmo as calcula de acordo com a quantidade de calor necessária a ser trocada com o outro fluido.

Além disso, o *software* não fornece um modelo de equipamento que simule exatamente uma membrana, por isso, como solução utilizou-se os modelos de Separadores (SEP) para representar a divisão das correntes de concentrado e permeado, porém, como esse modelo não é uma representação rigorosa das membranas, não permitia simular a perda de carga das suas correntes de saída quando considerada. Então foram utilizados os modelos de *Mixers* apenas com o objetivo de simular essa redução na pressão, principalmente, nas correntes de permeado. Todavia, ao simular o declínio da pressão, as temperaturas viam a diminuir também, então como deveriam ser mantidas iguais a temperatura da entrada (premissa do projeto), foram utilizados modelos de Heaters como solução. Assim, tanto os Separadores, como os Mixers e os Heaters não entraram no balanço de energia.

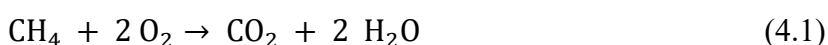
Além de delimitar a porcentagem molar dos componentes presentes no biometano, a Resolução ANP nº 886 de 2022 também impõe os valores de Poder Calorífico Superior (PCS) e do Índice de Wobbe (IW), cujo limites especificados para eles são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm), conforme Anexo A.

O Poder Calorífico se trata da energia liberada quando ocorre a combustão completa de um determinado combustível e a depender do que é feito com produtos de combustão, o poder

calorífico pode ser de alto ou de baixo poder calorífico (Zanck *et al.*, 2020). Segundo ABNT NBR 15.213:2008 (2008), o Poder Calorífico Superior de um gás se dá pelo calor liberado na combustão (queima) completa de uma quantidade definida desse gás com o ar, à uma pressão constante, onde os produtos da combustão retornam até a temperatura e pressão dos reagentes e toda a água formada se encontra no estado líquido. Enquanto o Poder Calorífico Inferior (PCI) tem uma definição parecida com a do PCS, a diferença é que o PCI considera que toda a água formada se encontra como vapor d'água.

Por fim, o Índice de Wobbe, cuja importância está associada a intercambiabilidade de diferentes gases para uma mesma aplicação ou queimador, isto é, em relação a potência de um dado queimador, gases com o mesmo número de Wobbe vão apresentar o mesmo desempenho energético (Bizzo, 2005). Com isso, o IW é considerado um indicador internacional que mede o conteúdo energético de um gás e sua intercambiabilidade (Ferreira, 2024).

Assim, a fim de verificar se o PCS e o IW do biometano produzido estavam de acordo com o que é exigido pela ANP (ver Anexo A) a partir da reação de combustão do biometano, vide equação (4.1), foram realizados os cálculos da entalpia dessa reação para quando a água formada se encontrava no estado líquido (l). E mesmo não sendo uma especificação para o biometano que conste no Anexo A, optou-se ainda assim por calcular também o PCI. Para isso, foi calculada a entalpia da reação de combustão, mas desta vez, considerou-se a entalpia de formação da água na forma de vapor (g) e manteve-se os valores de entalpia de formação para os demais.



Para tal, foi necessário levantar as entalpias padrões de formação (H_f) dos reagentes e produtos. Entretanto, esses valores são encontrados na literatura na temperatura de 25 °C, portanto, foi preciso a partir da entalpia na temperatura de referência (T_R) à 25 °C calcular as entalpias de formação na temperatura de 20° C para estar de acordo com o que é exigido pela Resolução e este cálculo foi baseado na equação (4.2). Os dados necessários para realização dos cálculos descritos aparecem na Tabela 4.3.

$$H_f(T) = H_f(T_R) - c_p (T_R - T) \quad (4.2)$$

TABELA 4.3 – PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA ENTALPIA DE COMBUSTÃO.

Parâmetros	Valores	Unidades
Entalpias de Formação à 25 °C		
CH ₄	74,85	kJ/mol
CO ₂	393,51	kJ/mol
H ₂ O (l)	285,84	kJ/mol
H ₂ O (g)	241,83	kJ/mol
Cp/R		
CH ₄	4,217	
CO ₂	4,467	
H ₂ O (l)	9,069	
H ₂ O (g)	4,038	
R	0,008314	kJ/mol.K
Cp		
CH ₄	0,03506	kJ/mol.K
CO ₂	0,037139	kJ/mol.K
H ₂ O (l)	0,0754	kJ/mol.K
H ₂ O (g)	0,033572	kJ/mol.K
Entalpias de Formação à 20 °C		
CH ₄	75,03	kJ/mol
CO ₂	393,70	kJ/mol
H ₂ O (l)	286,21	kJ/mol
H ₂ O (g)	242,00	kJ/mol

FONTE: Smith *et al.* (2018).

Ressalta-se que a entalpia padrão de formação do O₂ é zero por tratar-se de um elemento que já se encontra no seu estado padrão. Para o cálculo da entalpia da reação (ΔH_R) à 20 °C, utilizou-se os valores de H_f nessa mesma temperatura e o resultado se deu pela equação (4.3), variando a apenas a entalpia de formação da água de acordo com seu estado físico.

$$\Delta H_R = (H_{f,CO_2} + 2 * H_{f,H_2O}) - H_{f,CH_4} \quad (4.3)$$

A entalpia da reação de combustão obtida quando a água formada se encontrava em estado líquido foi de 891,10 kJ/mol. Então, descobriu-se a energia liberada em relação ao CH₄ (componente que foi consumido), multiplicando a entalpia da reação pela sua vazão molar de entrada, cujo valor era de 169150 mol/h, e o resultado dessa operação foi 1,47.10⁸ kJ/h. Enquanto a entalpia da reação quando a água formada se encontrava em estado gasoso foi de 802,67 kJ/mol. Em relação ao CH₄ a entalpia encontrada foi de 1,32.10⁸ kJ/h.

O PCS foi obtido a partir do quociente da entalpia de combustão em relação ao CH₄ quando a água formada se encontrava no estado líquido na mesma temperatura e pressão dos reagentes e a vazão volumétrica de biometano que entrou no reator, vide equação (4.4). Já o IW, de acordo com Ferreira (2024), “pode ser expresso como o quociente entre o PCS e a raiz quadrada da densidade relativa (ρ) desde que nas mesmas condições de pressão e temperatura”, conforme equação (4.5). E segundo Cetesb (2024), a densidade relativa do biometano, considerando que é formado basicamente por metano, é de aproximadamente 0,55. E para o cálculo do PCI foi considerado o quociente da entalpia de combustão em relação ao CH₄ quando a água formada se encontrava no estado gasoso na mesma temperatura e pressão dos reagentes e a vazão volumétrica do biometano, vide Equação (4.6).

$$PCS = \frac{1,47E^{08}}{4000 \text{ m}^3} \quad (4.4)$$

$$IW = \frac{PCS}{\sqrt{\rho}} \quad (4.5)$$

$$PCI = \frac{1,32E^{08}}{4000\text{m}^3} \quad (4.6)$$

O Poder Calorífico Superior encontrado foi de 36.627,30 kJ/m³, mantendo-se dentro da faixa para todas as regiões. O Índice de Wobbe para esse valor de PCS encontrado e densidade relativa considerada foi de 49.388,24 kJ/m³, ficando dentro da faixa para as regiões Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste, Sul e, acima da faixa para região Norte. O Poder Calorífico Inferior, como esperado, resultou em um valor menor que o superior, igual a 32.992,35 kJ/m³.

4.5 PROCESS FLOW DIAGRAM (PFD)

Diante de todos os documentos previamente gerados, tornou-se viável a construção do fluxograma do processo em estudo, vide Figura 4.6. Para sua criação foram usados os seguintes documentos de referência: BFD do processo (DE-SENAI-SGM-COO-01-A), memória de cálculo do dimensionamento da membrana (1° e 2° estágios) (MC-SENAI-SGM-PRO-01-A) e memória de cálculo do balanço de massa final (MC-SENAI-SGM-PRO-02), além é claro, da simulação do processo que forneceu o balanço de energia.

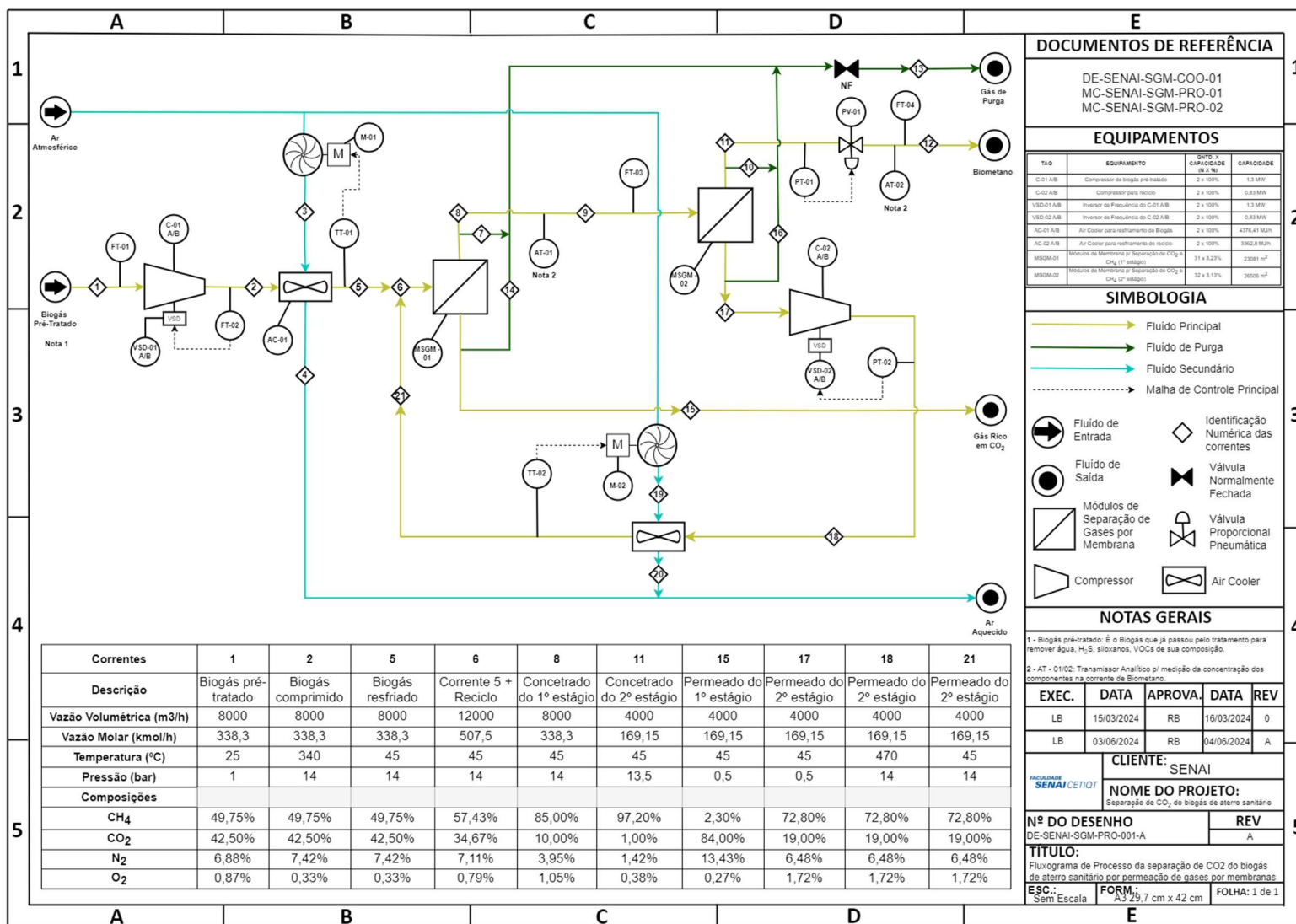
Ao confrontá-lo com o BFD, nota-se que o PFD ficou mais completo e rico em informações que era o desejável. Equipamentos e correntes antes não vistos no diagrama de blocos vieram à tona no fluxograma de processo, e não só isso, o balanço de massa deixou de ser preliminar para se consolidar como o balanço de massa final, contando ainda com o acréscimo do balanço de energia e com dados específicos dos equipamentos.

Quanto as correntes, no BFD foram representadas apenas as correntes de entrada e saída dos módulos de membrana e duas correntes de purga, uma para cada módulo. No PFD, além da corrente principal que contou com 17 correntes em virtude de haver mais equipamentos, compuseram o desenho 4 correntes de purga, especificamente uma na saída do permeado e do concentrado para cada estágio de módulos de membranas.

Ademais, contou com uma corrente de fluido secundária que seria a corrente de ar que adentra nos *air coolers* para trocar calor com os fluidos aquecidos. Elas foram numeradas pois são correntes que percorrem o sistema de forma paralela a corrente principal, ou seja, estão o tempo todo participando do processo, mas não entraram no balanço de massa, visto que a quantidade de ar necessária para a troca de calor não foi especificada na simulação.

A malha de controle principal também foi mais uma etapa desenhada no PFD que não aparecia no BFD, essa malha contou com cinco correntes, sendo duas de temperatura (TT) e três de pressão (PT). Além de fazer parte dela, outros transmissores que serviam só para leitura, atuadores como válvulas de controle proporcional, entre outros. A simbologia dos fluidos de entrada e saída deixaram de ser apenas círculos, adotando-se uma representação padrão de desenhos engenharia, com os conectores de entrada e saída sendo representados.

FIGURA 4.6 – FLUXOGRAMA DE PROCESSO COM BALANÇO DE MASSA E ENERGIA.



FONTE: O autor (2024).

No BFD os únicos equipamentos que apareciam eram os módulos de membranas e eram representados por caixas (quadrados), já no PFD apareceram também os compressores, *air coolers*, além da instrumentação contendo válvulas e outros instrumento. E todos representados por suas figuras pictóricas aproximadas ao que é visto numa planta real.

Após o biogás ser pré-tratado, removendo de sua composição compostos como sulfeto de hidrogênio, siloxanos, água e VOCs, ele entrou na unidade de SGM a 25°C e 1 bar com uma vazão de 8.000 m³/h (1), sendo monitorada a vazão pelo Transmissor de Vazão **FT-01**. Em seguida, ele foi comprimido através dos compressores **C-01 A/B**, com o aumento de pressão houve também um aumento de temperatura, chegando a uma temperatura de 340 °C e 14 bar de pressão (2), sendo essa a pressão necessária para o biogás adentrar a membrana, visto que, criou-se um diferencial de pressão (ΔP) fazendo com que o biogás fosse capaz de “atravessar” a membrana. A saída dos compressores **C-01A/B** foi monitorada através do transmissor de vazão **FT-02** e o controle da compressão se deu através dos inversores de frequência **VSD-01 A/B**.

No entanto, a temperatura ainda não estava ideal, então o biogás passou pelo *air cooler* (**AC-01**), cujo fluido que captava o calor do biogás era o próprio ar atmosférico. A temperatura de saída foi monitorada pelo Transmissor de Temperatura (**TT-01**), enquanto o controle do resfriamento do biogás se dava pelo Motor (**M-01**) que permitia a entrada de maiores ou menores vazões de ar atmosférico no **AC-01**, sendo ele capaz de resfriar o biogás até 45°C (5).

Após alcançar a temperatura e pressão desejada, o biogás entrou nos módulos de membrana do primeiro estágio (**MSGM-01**), dividindo-se em duas correntes de mesma temperatura, uma contendo gás rico em CO₂ (permeado) com vazão de 4000 m³/h e a uma mesma temperatura de 45 °C e a pressão de 0,5 bar (15), visto que houve uma perda de carga enquanto permeava a membrana, e outra com maior concentração de CH₄ (concentrado) com uma vazão de 8.000 m³/h e com temperatura e pressão iguais as da entrada (45°C e 14 bar) (8).

Além disso, a composição e a vazão da corrente 8 foram monitoradas pelo Transmissor Analítico **AT-01** e pelo Transmissor de Vazão **FT-03** respectivamente. Por conseguinte, era possível saber a composição e vazão da corrente 15 que seguiu para outra unidade que não estava contemplada no projeto, enquanto a corrente 8 seguiu para os módulos de membrana do segundo estágio (**MSGM-02**), cujo objetivo era aumentar a fração de CH₄ no biometano.

No segundo estágio, novamente, houve uma divisão em duas correntes, onde gerou-se os 4.000 m³/h de biometano (11), produto do processo, na mesma temperatura de entrada (45

°C) e com uma pressão de 13,5 bar, após ser considerado uma pequena perda de carga. A corrente **11** possuía monitoramento pelo transmissor de pressão **PT-01** e controle através da válvula de controle proporcional **PV-01**, contava também com um transmissor analítico (**AT-02**) e com um monitoramento de vazão através do **FT-04**.

Em contrapartida, a corrente de gás rico em CO₂ produzida (**17**) apresentava uma quantidade considerável de CH₄ em sua composição, para não perder essa quantidade de metano, foi necessário reciclar essa corrente, mas para isso ela precisou ser comprimida, pois sua pressão havia atingido 0,5 bar devido a perda de carga, sendo assim, não seria possível permear as membranas. Sua compressão se deu pelos compressores **AC-02 A/B**, cujo controle de pressão (**PT-02**) se dava pelos inversores de frequência **VSD-02 A/B**, alcançando então uma temperatura de 470 °C e 14 bar de pressão (**18**).

E mais uma vez, foi necessário levar o gás comprimido ao resfriamento, dessa vez, no **AC-02** cuja temperatura da corrente de saída do gás era monitorada pelo **TT-02** e seu controle era dado pelo **MV-02**, então foi gerada a corrente **21** com temperatura e pressão de 45 °C e 14 bar, respectivamente. Assim, ela pode se juntar a corrente de biogás da alimentação (**5**) no primeiro estágio de membranas (**MSGM-01**) fechando o ciclo com uma vazão de entrada no primeiro estágio de 12.000 m³/h (**6**).

A corrente de purga não é contínua e só é acionada quando necessário, por exemplo, em uma parada para manutenção dos módulos, removendo o gás que ficou na linha. Por esse motivo, foi posto uma válvula normalmente fechada (NF) para acionamento da corrente de purga. Tal válvula será especificada no futuro, em um projeto de detalhamento do processo, sendo especificada no Fluxograma de Engenharia de Tubulação e Instrumentação (P&ID).

O PFD também passou por uma revisão, a primeira versão continha trocadores de calor com água sendo o fluido frio, mas foi identificado mais tarde que por via de regra os aterros sanitários não devem ficar próximos à corpos hídricos por questões ambientais, a planta de tratamento do biogás que fica próxima ao aterro não teria de onde captar água para alimentar os trocadores. Então, normalmente, utilizam-se *air coolers* com o ar sendo o fluido frio.

A Figura 4.7 apresenta um recorte da tabela de balanço de massa e energia contida na área gráfica do PFD. Nela são vistas a descrição do fluido de cada corrente, e não só as vazões volumétricas, como também as vazões molares e a temperatura e pressão de cada corrente.

FIGURA 4.7 – RECORTE DO BALANÇO DE MASSA E ENERGIA NO PFD.

Correntes	1	2	5	6	8	11	15	17	18	21
Descrição	Biogás pré-tratado	Biogás comprimido	Biogás resfriado	Corrente 5 + Reciclo	Concentrado do 1º estágio	Concentrado do 2º estágio	Permeado do 1º estágio	Permeado do 2º estágio	Permeado do 2º estágio comprimido	Permeado do 2º estágio resfriado
Vazão Volumétrica (m ³ /h)	8000	8000	8000	12000	8000	4000	4000	4000	4000	4000
Vazão Molar (kmol/h)	338,3	338,3	338,3	507,5	338,3	169,15	169,15	169,15	169,15	169,15
Temperatura (°C)	25	340	45	45	45	45	45	45	470	45
Pressão (bar)	1	14	14	14	14	13,5	0,5	0,5	14	14
Composições										
CH ₄	49,75%	49,75%	49,75%	57,43%	85,00%	97,20%	2,30%	72,80%	72,80%	72,80%
CO ₂	42,50%	42,50%	42,50%	34,67%	10,00%	1,00%	84,00%	19,00%	19,00%	19,00%
N ₂	6,88%	7,42%	7,42%	7,11%	3,95%	1,42%	13,43%	6,48%	6,48%	6,48%
O ₂	0,87%	0,33%	0,33%	0,79%	1,05%	0,38%	0,27%	1,72%	1,72%	1,72%

FONTE: O autor (2024).

A Figura 4.8 traz um recorte da lista dos equipamentos que compõem o processo, junto de suas TAGs, quantidade vs capacidade utilizada em termos de porcentagem e a capacidade em termos de valor absoluto.

FIGURA 4.8 – RECORTE DA LISTA DE EQUIPAMENTOS DO PROCESSO.

TAG	EQUIPAMENTO	QNTD. X CAPACIDADE (N X %)	CAPACIDADE
C-01 A/B	Compressor de biogás pré-tratado	2 x 100%	1,3 MW
C-02 A/B	Compressor para reciclo	2 x 100%	0,83 MW
VSD-01 A/B	Inversor de Frequência do C-01 A/B	2 x 100%	1,3 MW
VSD-02 A/B	Inversor de Frequência do C-02 A/B	2 x 100%	0,83 MW
AC-01 A/B	Air Cooler para resfriamento do Biogás	2 x 100%	4376,41 MJ/h
AC-02 A/B	Air Cooler para resfriamento do reciclo	2 x 100%	3362,8 MJ/h
MSGM-01	Módulos de Membrana p/ Separação de CO ₂ e CH ₄ (1º estágio)	31 x 3,23%	23081 m ²
MSGM-02	Módulos de Membrana p/ Separação de CO ₂ e CH ₄ (2º estágio)	32 x 3,13%	26506 m ²

FONTE: O autor (2024).

A lista de equipamentos mostra que adotou-se dois compressores com capacidades de 100% da planta, um operando e outro em *stand-by* ou manutenção, sendo reserva do operacional. Os compressores que estiverem em operação realizam dois serviços, comprimindo o biogás pré-tratado e a corrente de reciclo. Cada compressor necessita de um inversor de frequência para atuar sob seus respectivos motores, todos também tendo itens reservas.

Foi considerado também itens reservas para os *air coolers* do processo, com cada um sendo capaz de processar 100% da capacidade da planta. O processo possui também dois serviços de resfriamento: para o biogás pós-compressão e para a corrente de reciclo.

Já os módulos de membrana, equipamentos principais do processo de SGM, atuaram com 31 módulos no primeiro estágio enquanto no segundo atuaram com 32 módulos. Cada módulo contribui 3,23% da capacidade total do primeiro estágio e 3,13% da capacidade total do segundo estágio. As áreas das membranas foram apresentadas na lista, mas seus cálculos serão desenvolvidos no próximo tópico.

A Figura 4.9 faz menção ao campo de notas gerais, nele foram dispostas informações que careciam de uma maior explicação.

FIGURA 4.9 – RECORTE DO CAMPO DE NOTAS GERAIS.

NOTAS GERAIS	
1	- Biogás pré-tratado: É o Biogás que já passou pelo tratamento para remover água, H ₂ S, siloxanos, VOCs de sua composição.
2	- AT - 01/02: Transmissor Analítico p/ medição da concentração dos componentes na corrente de Biometano.

FONTE: O autor (2024).

A identificação dos documentos foi dividida em seis partes, a primeira sigla diz respeito ao seu nome, por exemplo, TP refere-se a Tabela de Processos, MC a Memória de Cálculos e DE é Desenho. Já a segunda parte é nome do cliente para qual está sendo produzido o documento. A terceira é a sigla do nome do processo, a quarta é a etapa em que o documento está sendo produzido, nesse caso, COO significa Coordenação e PRO remete a processo. A quinta traz um número para diferenciar documentos cuja identificação seja igual e por fim, vem a revisão do documento sendo sequenciado através das letras do alfabeto.

4.6 DIMENSIONAMENTO DA MEMBRANA

Com a membrana prontamente selecionada, se iniciaram os cálculos do seu dimensionamento, cujo objetivo principal foi calcular a área total de membranas para ambos os

estágios. As equações (4.7) a (4.11) foram utilizadas na etapa de dimensionamento da membrana:

$$\text{Área do Módulo} = \pi * D_{\text{interno}} * L_{\text{fibra}} \quad (4.7)$$

$$\text{Volume do Módulo} = \pi * \frac{D_{\text{módulo}}^2}{4} * L_{\text{módulo}} \quad (4.8)$$

$$\text{Espessura da Fibra} = \frac{D_{\text{externo}} - D_{\text{interno}}}{2} \quad (4.9)$$

$$\text{Área Total da Membranas} = \frac{N_{\text{CO}_2, \text{Permeado}} * \text{Espessura da Fibra}}{\text{Permeabilidade}_{\text{CO}_2} * \text{Pressão}} \quad (4.10)$$

$$\text{Nº de Módulos} = \frac{\text{Área da Membrana}}{\text{Área do Módulo}} \quad (4.11)$$

Em que:

D_{interno} = diâmetro interno da fibra em metros;

D_{externo} = diâmetro externo da fibra em metros;

L_{fibra} = extensão das fibras em metros;

$N_{\text{CO}_2, \text{Permeado}}$ = vazão molar do CO_2 na corrente de permeado;

$\text{Permeabilidade}_{\text{CO}_2}$ = Permeabilidade do CO_2 em $\text{mol} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$;

Pressão = Pressão de operação em Pascal;

$D_{\text{módulo}}$ = diâmetro do módulo em metros;

$L_{\text{módulo}}$ = comprimento do módulo em metros;

Segundo Air Liquide (2023b), um módulo de 12 polegadas ou 0,305 metros de diâmetro contém de algumas dezenas a 1 milhão de fibras, que se colocadas uma após a outra alcançariam 750,0 milhas ou 1.207.008,0 metros de extensão (comprimento da fibra).

Como o biogás está permeando as membranas de dentro para fora, deve-se considerar para o cálculo da área total da membrana a espessura da fibra que será o caminho o qual o CO₂ deverá permear. A espessura é em função de D_{externo} e de D_{interno} da fibra, esse último ficou como uma variável, ou seja, não foi pré-estabelecido seu valor, já o diâmetro externo das membranas do tipo fibra oca de acordo com Chen *et al.* (2015), podem variar de 50 até 3000 µm e para pressões baixas a faixa varia de 200 a 500 µm. Portanto, foi escolhido um D_e de 200 µm ou 0,0002 metros para as membranas do primeiro estágio e um D_e de 250 µm ou 0,000250 metros para as do segundo estágio.

Como pré-requisito ficou estabelecido que o primeiro estágio contaria com 31 módulos e o segundo com 32 módulos, para isso foi preciso manipular o D_i da fibra, visto que, todas as outras grandezas que influenciavam o número de módulos possuíam valores fixos. Para tal, foi utilizado a ferramenta *Solver* do *Excel* para encontrar um valor ótimo de D_i que retornasse o número desejado de módulos.

Uma forma de constatar se o equipamento está de acordo com o que se encontra na literatura é através do número da Densidade de Empacotamento do Módulo (DEM), trata-se da relação entre a área de membranas e o volume do módulo (m²/m³) de acordo com Baker (2002). Foi considerado o valor máximo de densidade de empacotamento para um módulo do tipo fibra oca que é de 10.000 m²/m³ (Chen *et al.*, 2015). Assim, os dados variáveis que poderiam ser manipulados para obter essa DEM eram o D_i e o comprimento do módulo, ambos os dados não foram pré-estabelecidos pelo fabricante e nem encontrados na literatura. No entanto, o D_i já havia sido definido para obter o número de módulos desejável. Com isso, utilizou-se mais uma vez, a ferramenta *Solver* para encontrar o comprimento do módulo que resultasse na DEM específica para membranas de fibra oca.

Outro parâmetro essencial para o dimensionamento, em especial, para a área da membrana é a permeabilidade do componente que permeia a membrana, neste caso, o CO₂, assim como também, é interessante obter a seletividade do material da membrana CO₂/CH₄, logo, é preciso obter a permeabilidade do CH₄ também. Na prática, o fabricante da membrana é quem fornece esse parâmetro já dentro das condições de operação dela, mas não foram encontradas para a membrana selecionada as permeabilidades de CO₂ e CH₄ exatas. Então essas informações foram buscadas na literatura onde foram encontrados valores de permeabilidade em condições de operação bem próximas as do projeto.

Conforme apresentadas na Tabela 4.4, foram encontradas as permeabilidades nas temperaturas de 30 °C e 60 °C cuja média resulta exatamente na temperatura de operação pré-determinada de 45 °C, por conseguinte, realizou-se uma média aritmética entre os valores de permeabilidade encontrados, e utilizou-se como parâmetros os resultados dessa média. As permeabilidades médias do CO₂ e do CH₄, em termos Sistema Internacional de Unidades (SI), resultaram respectivamente em $4,0 \cdot 10^{-15}$ e $1,0 \cdot 10^{-30}$ mol.m.m⁻² s⁻¹ Pa⁻¹.

TABELA 4.4 – PERMEABILIDADES DO CO₂ E CH₄ EM MEMBRANAS DE POLIIMIDA A PARTIR DA MÉDIA ARITMÉTICA DAS PERMEABILIDADES ENCONTRADAS NA LITERATURA.

Referências	Permeabilidade CO ₂ (Barrer)	Permeabilidade CH ₄ (Barrer)	Permeabilidade N ₂ (Barrer)	Permeabilidade O ₂ (Barrer)	Temperatura (C°)
(Basu <i>et al.</i> , 2010)	10,7	0,25	0,32	2,13	30
(Baker, 2012)	13,0	0,4	0,6	3,0	60
Média Aritmética					
-	11,9	0,33	0,46	1,50	45

FONTE: Autor (2024).

NOTA: 1 Barrer = 10^{-10} cm³ (STP) cm cm⁻² s⁻¹ cmHg⁻¹ = $3,35 \cdot 10^{-16}$ mol m m⁻² s⁻¹ Pa⁻¹.

Como premissa adotou-se a configuração da unidade de SGM em dois estágios, logo, foi necessário realizar o dimensionamento para cada estágio, visto que, de acordo com o balanço de massa preliminar, a vazão de alimentação de cada um deles era diferente. Portanto, são apresentadas separadamente na Tabela 4.5 os dados dimensionais para cada um deles.

TABELA 4.5 – DIMENSIONAMENTO DA MEMBRANA DO 1° E 2° ESTÁGIO.

Formas de Obtenção	Propriedades	Valores Encontrados	
		1° Estágio	2° Estágio
<i>Solver</i>	Diâmetro Interno	193,5 µm	217 µm
<i>Solver</i>	Comprimento do Módulo	1,0 m	1,1 m
Eq. (4.7)	Área do Módulo	733,7 m ²	822,8 m ²
Eq. (4.8)	Volume do Módulo	0,07 m ³	0,08 m ³
Eq. (4.9)	Espessura da Fibra	3,3 µm	17 µm
Eq. (4.10)	Área Total da Membrana	23.081 m ²	26.506 m ²

FONTE: Autor (2024).

Em virtude da escolha de um diâmetro externo dentro da faixa encontrada na literatura, com a manipulação do diâmetro interno da fibra para alcançar o número de módulos de acordo com o que foi estabelecido, e do comprimento do módulo permitindo alcançar uma DEM dentro do que se apresentava na literatura, os resultados do dimensionamento se mostraram coerentes.

De acordo com a equação 2.7, o fluxo que está ligado diretamente a vazão é inversamente proporcional a espessura da fibra, por isso, pelo fato da vazão de CO₂ no permeado ser menor no segundo estágio, a espessura da fibra foi maior que no primeiro estágio. No Quadro 2.4 foi visto que a área por módulo para fibra ocas era de aproximadamente 300 – 600 m². A área por módulo encontrada no primeiro e segundo estágio ficou um pouco acima, 733,7 m² e 822,8 m² respectivamente, mas por considerar uma aproximação entende-se que o valor encontrado também está condizente com a literatura. Ressalta-se que o dimensionamento dos demais equipamentos não faziam parte do escopo do projeto.

4.7 PEGADA DE CARBONO

Como um adendo ao trabalho realizado, foi simulado através da calculadora de redução de emissões de carbono disponibilizada pela Gás Verde em seu site, as emissões da planta (pegada de carbono), o valor que seria necessário para compensá-la e como o biometano poderia ajudar na redução dessas emissões. O cálculo é realizado a partir do *GHG Protocol*, com euro e valor do crédito de carbono europeu, atualizados diariamente (Gás Verde, 2024).

Segundo WRI Brasil (2024), o *GHG Protocol* abrange um pacote de padrões, orientações, ferramentas e treinamentos para que empresas e governos possam mensurar e gerenciar as emissões causadas pelo homem responsáveis pelo aquecimento global. Ele permite que atores públicos e privados mensurem e reportem de maneira confiável o impacto climático de suas atividades em termos de emissão de GEE, possibilitando o planejamento de ações de mitigação.

Comparou-se a mesma quantidade de biometano produzido pela planta do projeto (4.000 m³/h) caso fosse gerado gás natural em seu lugar. Conforme Turton *et al.* (2018), levou-se em consideração que a planta opere 95% do ano e os outros 5% do tempo sejam para paradas de manutenção. O cálculo para encontrar o volume consumido anual pode ser visto na equação 4.12.

$$\begin{aligned}
 & \text{Volume anual} = \\
 & 4.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 24h * 365 \text{ dias} * 0,95
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

Assim, o volume consumido anual seria de aproximadamente 33.288.000 m³. A calculadora retornou os seguintes resultados: caso fosse o GN, as emissões seriam de 68.906 toneladas CO₂e/ano. Dessa forma, ao optar pelo biometano, foi reduzido em 99,91% as emissões de gases poluentes, e deixou-se de pagar R\$ 27.110.922,35 em compra crédito de carbono por ano.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÃO

Com o cenário climático atual cada vez mais se faz necessário pensar caminhos que desacelerem as crises climáticas derivadas de ações humanas. Por isso, o presente trabalho apresentou como uma alternativa para mitigar as emissões de GEEs a realização de um projeto conceitual que envolve a tecnologia de permeação de gases por membranas para remover CO₂ do biogás de aterro sanitário. Esse gás, que seria um perigo eminente caso fosse liberado diretamente na atmosfera, pós remoção de CO₂ adquiri o nome de biometano e pode substituir ou complementar o combustível fóssil gás natural em suas aplicações. Portanto, essa alternativa mostrou-se muito promissora para ser utilizada no combate às crises climáticas.

A realização do projeto, baseou-se na metodologia FEL. Seu uso atendeu, deu uma certa robustez ao projeto, visto que havia uma sequência a ser seguida para desenvolver as atividades, onde uma foi complementando a outra. Por isso, para seguir para as próximas etapas era preciso concluir antes as atividades anteriores, evitando maiores esforços. Os documentos gerados também foram essenciais para o projeto, se o PFD fosse construído logo de primeira, provavelmente não estaria contemplando todos os elementos necessários, gerando retrabalhos.

Ficou evidente que a falta de padronização dos módulos de membranas para separação de gases do biogás provocou uma certa dificuldade na escolha de qual módulo utilizar e isso poderia atrapalhar o desenvolvimento do projeto, visto que as membranas eram os principais equipamentos do processo. Entretanto, usou-se como saída a aplicação de um formulário junto a especialistas e conhecedores do processo que permitiu trazer uma maior veracidade a tomada de decisão.

O uso dos módulos de membranas de fibra oca assimétrica à base de poliimida e a disposição em dois estágios de módulos de membranas se mostraram eficazes para o processo de remoção de CO₂ do biogás, visto que o biometano produzido atendeu as exigências da resolução da ANP vigente. Por fim, baseado nos resultados da pegada de carbono, o biometano mostra-se uma opção viável para a redução dos GEE e, conseqüentemente, um excelente caminho para mitigar as ameaças climáticas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se realizar um projeto conceitual de uma planta de tratamento de biogás completa, incluindo além da remoção de CO₂, a remoção de outros componentes presentes nele, adicionando todas as tecnologias/operações unitárias necessárias. Outra sugestão seria realizar a análise de viabilidade econômica dessa planta completa, a fim de estimar o quão rentável o tratamento correto de resíduos orgânicos e o *upgrading* do biogás produzido pode ser ao transformá-lo em um combustível como o biometano. Pensar na mudança do arranjo de estágios, a fim de obter um maior teor de metano na composição final de biometano, mas que não aumente tanto os custos de operação. Por fim, outra sugestão de trabalho futuro seria construir o P&ID e a maquete eletrônica 3D do processo estudado no presente trabalho e depois da planta completa de tratamento de biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINI, R. Geração de Energia – Biogás de Aterro Sanitário. Disponível em: <https://marcaambiental.com.br/geracao-de-energia-biogas-de-aterro-sanitario/>. Acesso em: 30 maio. 2024.

AIR LIQUIDE. **Biogas Campaign | Air Liquide Advanced Separations**. 2023a. Disponível em: <https://advancedseparations.airliquide.com/biogas-campaign>. Acesso em: 16 nov. 2023.

AIR LIQUIDE. **MEDALTM membrane systems for Biogas/Landfill gas**. Disponível em: <https://paperzz.com/doc/6808584/medaltm-membrane-systems-for-biogas-landfill-gas>. Acesso em: 24 maio. 2024.

AIR LIQUIDE. **MEMBRANE SOLUTIONS FOR NATURAL GAS TREATMENT**. NEWPORT, DE: Air Liquide, 2016. Disponível em: https://advancedseparations.airliquide.com/sites/alas/files/2016/11/28/alas_ng_brochure_final.pdf. Acesso em: 18 nov. 2023.

AIR LIQUIDE. **Our Membranes | Air Liquide USA**. 2023b. Disponível em: <https://usa.airliquide.com/innovation-technology/membrane-technology/our-membranes#14291>. Acesso em: 16 nov. 2023.

ASPEN PLUS[®]. **ASPEN PLUS V.11 - aspenONE**. Aspen Technology Inc[©], 2019. 1 *Software*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE GÁS CANALIZADO (ABEGÁS). **Produção de biometano pode atingir 5,9 mi de Nm³/dia em 2029 - ABEGÁS**. 2023. Disponível em: <https://www.abegas.org.br/arquivos/86817>. Acesso em: 1 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 8419:1992. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 15213:2008. **Gás natural e outros combustíveis gasosos – Cálculo do poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de Wobbe a partir da composição**. ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABIOGÁS). **Nota Técnica: PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS**. ABIOGÁS, 2022. Disponível em: <https://abiogas.org.br/biblioteca>. Acesso em: 1 mar. 2024.

BAKER, R. W. Future Directions of Membrane Gas Separation Technology. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 41, n. 6, p. 1393–1411, 2002.

BAKER, R. W. **Membrane Technology and Applications**. 3. ed. Newark, California: John Wiley & Sons, 2012.

BASU, S. *et al.* Membrane-based technologies for biogas separations. *Chemical Society reviews*, v. 39, n. 2, 2010.

BERNARDO, P.; DRIOLI, E.; GOLEMME, G. Membrane Gas Separation: A Review/State of the Art. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 10, p. 4638–4663, 2009.

BIZZO, W. **EM 722 -Geração, Distribuição e Utilização de Vapor cap. 2 - COMBUSTÍVEIS.** 2005. Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>. Acesso em: 30 maio. 2024.

BOND, T.; TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, v. 15, p. 347-354, 2011.

BRASIL, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **RESOLUÇÃO ANP Nº 886.**, 29 jul. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-886-2022-estabelece-a-especificacao-e-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-industriais-e-comerciais-a-ser-comercializado-no-territorio-nacional?origin=instituicao>. Acesso em: 20 nov. 2023.

BRASIL, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Sistemas de Movimentação de Produtos (SIMP). **Painel Dinâmico de Produtores de Biometano.** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biometano>. Acesso em: 1 abr. 2024.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031.** Brasília: MME/EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-609/Relatorio_PDE2031_ConsultaPublica.pdf. Acesso em: 23 mar. 2024.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente (MME). **PROGRAMA NACIONAL METANO ZERO.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MME), 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/ozonio/ProgramaMetanoZero.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2024.

CHEN, X. Y. *et al.* Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. **RSC Advances**, v. 5, n. 31, p. 24399–24448, 2015.

CHOMA, A. **O que é a Metodologia FEL (Front-End Loading), afinal de contas?** Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/o-que-%C3%A9-metodologia-fel-front-end-loading-afinal-de-contas-choma/>. Acesso em: 24 maio. 2024.

CHUAH, C. Y. *et al.* Harnessing Filler Materials for Enhancing Biogas Separation Membranes. **Chemical Reviews**, v. 118, n. 18, p. 8655–8769, 2018.

CIBIOGÁS. **PANORAMA DO BIOGÁS NO BRASIL**. [s.l.: s.n.]. 2022. Disponível em: https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_do_Biogs_no_Brasil_2022.pdf. Acesso em: 24 abr. 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Produtos Químicos - CETESB**. 2024. Disponível em: <https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/774>. Acesso em: 31 maio. 2024.

DRAW.IO. **Diagram Software and Flowchart Maker**. 2023. Disponível em: <https://www.drawio.com/>. Acesso em: 1 dez. 2023.

ECO CIRCUITO. **Lixo orgânico: desafio para a gestão de resíduos no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://ecocircuito.com.br/desafio-lixo-organico/>. Acesso em: 2 abr. 2024.

EVONIK. **SEPURAN® Green Membrane technology for efficient biogas upgrading**. United States: [s.n.]. 2023. Disponível em: https://products.evonik.com/assets/44/34/SEPURAN_Green_for_upgrading_biogas_en_EN_Asset_684434.pdf. Acesso em: 30 abr. 2024.

FERREIRA, J. **Índice de Wobbe: como calcular, interpretar e simular**. Disponível em: <https://www.sydle.com/br/blog/indice-de-wobbe-65a16762293e5a3705227be4>. Acesso em: 26 maio. 2024.

FERREIRA, R. T. **Biogás. Flickr**, 2009. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/ricardoterencio/3930329276>. Acesso em: 28 maio. 2024.

GÁS VERDE. **Gás Verde - Soluções para um mundo sustentável**. 2024. Disponível em: <https://gasverde.com.br/>. Acesso em: 04 jun. 2024.

GE, M.; FRIEDRICH, J.; VIGNA, L. 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors. **World Resources Institute**, 6 fev. 2020. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>. Acesso em: 23 mar. 2024.

GONÇALVES, C. et al. **Geração de energia elétrica no brasil a partir do biogás de aterros sanitários**. Campina Grande, PB: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1442.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2024.

GRABSKI, M. A. N. **CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA E ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA INJEÇÃO DE BIOMETANO EM REDE DE GÁS NATURAL**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GUPTA, U. G.; CLARKE, R. E. Theory and applications of the Delphi technique: A bibliography (1975–1994). **Technological Forecasting and Social Change**, v. 53, n. 2, p. 185–211, out. 1996.

IEA – International Energy Agency. Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth, IEA, Paris. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>, Licence: CC BY 4.0. Acesso em: 23 mar. 2024.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **CLIMATE CHANGE 2023: Synthesis Report A Report**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Acesso em: 5 maio. 2024.

JERGEAS, G. Analysis of the Front-End Loading of Alberta Mega Oil Sands Projects. **Project Management Journal**, v. 39, n. 4, p. 96, 2008.

JUCÁ, J. F. T. **Aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários de RSU**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer/biblioteca/Aulaonline_AproveitamentoEnergeticoProfFernandoJuca_compressed.pdf. Acesso em: 15 out. 2023.

KUNDU, P. **Process Analysis of Asymmetric Hollow Fiber Permeators, Unsteady State Permeation and Membrane-Amine Hybrid Systems for Gas Separations**. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Chemical Engineering — University of Waterloo, Canadá, 2013.

LIMA, A. K. de.; SANTOS, R. B. ANÁLISE COMPARATIVA DO BIOGÁS: PROCESSO EM BIODIGESTORES E DE ATERRO SANITÁRIO. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 6, n. 1, p. 48–57, 2016.

MELO, H. C. de. **ANÁLISE DA PRIORIZAÇÃO DE ATIVIDADES CRÍTICAS EM PROJETOS LINEARES: ESTUDO DE CASOS EM PROJETOS FERROVIÁRIOS**. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2014.

MICROSOFT EXCEL. **EXCEL 2016**. Microsoft Corportion, 2016. 1 Programa de Computador.

MILANEZ, A. Y. et al. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275, mar. 2018.

OSBORNE, J. et al. What ?ideas-about-science? should be taught in school science? A Delphi study of the expert community. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 40, n. 7, p. 692–720, 25 ago. 2003.

QUANTA. **Front End Engineering Design:A closer look to FEL 1, 2, and 3 deliverables**. 2016. Disponível em: <https://www.quantaprocess.com/front-end-engineering-design-a-closer-look-to-fel-1-2-and-3-deliverables/>. Acesso em: 24 maio. 2024.

RABONI, M.; URBINI, G.. Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 9, n. 2, p. 191–202, 2014.

ROMERO, F.; DE MORAES, G.; HORIZONTE, B. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CONCEPÇÃO DE PROJETOS DE CAPITAL EM MEGA EMPREENDIMENTOS**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Belo Horizonte, 2010.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Elsevier Ltd.**, v. 35, n. 5, p. 1633–1645, 2011.

SABOIA, R. **A inserção do Biogás/Biometano na matriz energética brasileira AUDIÊNCIA PÚBLICA Comissão Especial para Estudo das Iniciativas para a Transição Energética gov.br**. Rio de Janeiro, RJ: ANP, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/apresentacoes-palestras/2024/arquivos/2024-02-06-dg-cam-dep-biometano.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2024.

SEIXAS, J.; FOLLE, S. M.; MARCHETTI, D. **Construção e funcionamento de biodigestores**. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 2014.

SMITH, J. M. et al. **Introduction to chemical engineering thermodynamics**. 8. ed. New York, Ny: Mcgraw-Hill Education, 2018.

SPANGLER, R. **Front End Loading (FEL) and Process Engineering Workflow**. Relatório de projeto de campo EMGT apresentado em requisitos de preenchimento parcial para o grau de mestre em ciências—Programa de Gestão de Engenharia e Faculdade da Escola de Pós-Graduação da Universidade do Kansas, 2005.

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

TURTON, R.; SHAEIWITZ, A. J.; BHATTACHARYYA, D.; WITHING, W. B. **Analysys, synthesis, and design of chemical process**. Prentice hall. 4 th edition. 2018. Disponível em: <https://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/9780132618120/samplepages/0132618125.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2024.

VERTOWN. **Como funciona o aterro sanitário?** 2024. Disponível em: <https://www.vertown.com/blog/como-funciona-o-aterro-sanitario/>. Acesso em: 28 maio. 2024.

WIJMANS, J. G.; BAKER, R. W. The solution-diffusion model: a review. **Journal of Membrane Science**, v. 107, n. 1-2, p. 1–21, nov. 1995.

WRI BRASIL. **GHG Protocol | WRI Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/projetos/ghg-protocol>. Acesso em: 1 jun. 2024.

ZANCK, C. C. et al. As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis. **Exacta**. v.18, n. 3, p. 502-516, 10 jul. 2020.

ZENATTI, D. C. **AULA BIOGÁS OBTENÇÃO E APROVEITAMENTO**. 2023. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7933609/mod_folder/content/0/AULA-BIOG%C3%81S-BIOENERGIA1.pdf. Acesso em: 24 abr. 2024.

APÊNDICE A – RESPOSTAS DA QUESTÃO 04 DO FORMULÁRIO

Baseado em minha experiência na área de biogás, as três empresas são muito similares quanto à recuperação de CH₄. Até o momento, a Evonik foi a que apresentou os melhores números, mas de forma bem ligeira. Os fornecedores não abrem a tecnologia (polímero) utilizada por fins comerciais, mas as membranas com maiores recuperações (segundo eles) são as de fibra oca, com o sentido do gás de dentro para fora. Existem dois pontos fundamentais que variam a recuperação de CH₄. O primeiro, seria a utilização de 3 estágios, onde aumenta-se a recuperação em relação à utilização de 2 estágios. Além disso, a capacidade de reciclo também aumenta a recuperação. Em detrimento, tem-se o aumento dos custos e consumo de energia elétrica.
Possui capacidade de altas pureza, baixo consumo de energia e a modularidade do sistema são pontos muito positivos!
Módulo em espiral tem maior resistência a altas pressões
Em relação aos módulos espirais com membranas planas, os módulos de fibra oca possuem maior densidade de empacotamento, relação entre metro quadrado de membranas e volume ocupado pelo módulo de membranas. Isso faz com que se reduza o espaço ocupado pela planta. Adicionalmente, as fibras ocas possibilitam a construção de módulos com elevadas áreas, o que barateia o custo de produção e reduz gastos com tubulação e válvulas na montagem do equipamento. Já a questão da fibra oca com filtração de dentro para fora ou de fora para dentro, a alimentação direta na superfície filtrante faz com que a camada seletiva interna (filtração de dentro para fora) tenha condições hidrodinâmicas mais vantajosas, podendo aproveitar por completo a área de membranas disponível. As fibras com filtração de fora para dentro tem alimentação do gás pela carcaça, havendo possibilidade de criação de caminhos preferenciais entre as fibras, podendo ter fibras que não participam da filtração. Um ponto de atenção das fibras com filtração de dentro para fora é a possibilidade de perda do soluto de interesse por vazamento axial pela parede das fibras, possível de acontecer em algumas separações.
Melhor seletividade, resistência mecânica e densidade de empacotamento.
Operação em baixa pressão com maior relação área/volume, alta estabilidade química e térmica em ambiente com traços de H ₂ S e NH ₃ .
Por causa da pressão e resistência mecânica
Já realizei um projeto durante a faculdade em que utilizei essa configuração baseada na membrana fornecida pela Air Liquide, e consegui desenvolver bem. Naquela ocasião, foi concebido apenas um estágio, mas existem outras combinações que envolvem mais de um estágio e aumentam eficiência do processo.
Os aumentos da densidade de empacotamento e da resistência à pressões de operação maiores são diretamente correlacionadas com a diminuição do diâmetro das fibras ocas. Tais diâmetros reduzidos podem promover perdas de cargas elevadas caso a filtração seja de fora para dentro da fibra, com o lúmen interno estando a baixa pressão. Daí a vantagem em manter o lúmen da fica no compartimento de alta pressão, possibilitado com a filtração de dentro para fora da fibra.
Módulo amplamente testado, com resultados satisfatórios, em condições mais extremas do que aquelas encontradas no processamento de biogás.
Não existe um consenso de qual seria a melhor. Cada configuração pode ser aplicada eficientemente para o fim desejado.
Alimentação diretamente na camada seletiva das membranas; maior densidade de empacotamento; e o a parte interna da membrana no compartimento de maior perda de carga.

APÊNDICE B – RESPOSTAS DA QUESTÃO 05 DO FORMULÁRIO

Sim.
Não acredito
Não. Enquanto o mercado for restrito para algumas empresas, cada uma ficará com o seu padrão de módulo, o que é um entrave para uso da tecnologia em maior escala.
No caso de ampliação de mercado, a padronização dos módulos pode ser uma estratégia comercial.
Sim
Talvez, assim como aconteceu para OI e NF
Sim, o mesmo já ocorre na área do gás natural. Então creio que com o crescimento dessa área de biogás pode haver sim esta padronização em breve.
Para o cliente final seria o ideal. Entretanto, enquanto não houver fornecedores somente de módulos de permeação, não fornecendo a solução de engenharia completa, não ocorrerá tal padronização.
Sim, como já existe para a OI.
Difícil haver uma padronização no futuro. Cada fornecedor utiliza sua configuração própria, materiais das membranas e dimensões dos módulos como uma estratégia de proteção de seus produtos, garantindo a reposição dos produtos vendidos sem concorrência com outras empresas.
Seria fundamental para aumento da base instalada da tecnologia, reduzindo os custos.

ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO BIOMETANO ORIUNDO DE ATERROS E ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Característica	Unidade	Limite (1)			Método (2)			
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO	EN/NF
Poder Calorífico Superior	kJ/m3	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000		15213	3588	6976	-
	kWh/m3	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94					
Índice de Wobbe	kJ/m3	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500		15213	-	6976	-
Metano, mín.	% mol	90,0	90,0		14903	1945	6974	-
Etano (3)	% mol	anotar	anotar		14903	1945	6974	-
Propano (3)	% mol	anotar	anotar		14903	1945	6974	-
Butanos e mais pesados (3)	% mol	anotar	anotar		14903	1945	6974	-
Oxigênio, máx.	% mol	0,8	0,8		14903	1945	6974	-
CO2, máx.	% mol	3,0	3,0		14903	1945	6974	-
CO2 + O2 +N2, máx.	% mol	10			14903	1945	6974	-
Enxofre Total, máx.(4,5)	mg/m3	70			15631	5504	6326-3 6326-5 19739	-
Gás Sulfídrico (H2S), máx.	mg/m3	10			15631	4084-07 4323-15 5504 6228	6326-3 19739	-
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx. (6)	°C		- 39	- 45	15765	5454	6327 10101-2 10101-3 11541	-
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos (7,8,9,10)	°C	15	15	0	16338	-	23874	-
Teor de siloxanos, máx.	mgSi/m3	0,3	0,3		16560 16561	-	-	-
Clorados, máx.	mgCl/m3	5,0	5,0		16562	-	-	EN 1911
Fluorados, máx.	mgF/m3	5,0	5,0		16562	-	15713	X43-304

FONTE: Brasil, ANP (2022).

Página de assinaturas

Bárbara B

Bárbara Bergamo
118.163.887-93
Signatário

Assinado eletronicamente

Héctor Silva
132.388.197-20
Signatário

Roberto Bentes de Carvalho

Roberto Carvalho
575.651.982-34
Signatário

Mateus N

Mateus Nascimento
142.438.847-30
Signatário

HISTÓRICO

- | | | |
|-------------------------|---|---|
| 26 jun 2024
17:21:16 |  | Laura da Silva Bezerra criou este documento. (Email: lauradasilvabezerra19@gmail.com) |
| 27 jun 2024
22:49:52 |  | Roberto Bentes de Carvalho (Email: rbcarvalho@cetiqt.senai.br, CPF: 575.651.982-34) visualizou este documento por meio do IP 177.41.61.171 localizado em Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brazil |
| 27 jun 2024
22:50:29 |  | Roberto Bentes de Carvalho (Email: rbcarvalho@cetiqt.senai.br, CPF: 575.651.982-34) assinou este documento por meio do IP 177.41.61.171 localizado em Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brazil |
| 26 jun 2024
18:53:36 |  | Bárbara de Souza Bergamo (Email: babibergamo@gmail.com, CPF: 118.163.887-93) visualizou este documento por meio do IP 191.247.23.11 localizado em Fortaleza - Ceará - Brazil |
| 26 jun 2024
18:55:45 |  | Bárbara de Souza Bergamo (Email: babibergamo@gmail.com, CPF: 118.163.887-93) assinou este documento por meio do IP 191.247.23.11 localizado em Fortaleza - Ceará - Brazil |
| 28 jun 2024
08:13:53 |  | Mateus Mansano do Nascimento (Email: mateusmn95@gmail.com, CPF: 142.438.847-30) visualizou este documento por meio do IP 187.16.108.98 localizado em Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brazil |
| 28 jun 2024
08:14:44 |  | Mateus Mansano do Nascimento (Email: mateusmn95@gmail.com, CPF: 142.438.847-30) assinou este documento por meio do IP 187.16.108.98 localizado em Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brazil |
| 27 jun 2024
08:40:30 |  | Héctor Napoleão Cozendey da Silva (Email: hnsilva@cetiqt.senai.br, CPF: 132.388.197-20) visualizou este documento por meio do IP 177.47.105.2 localizado em Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brazil |



27 jun 2024
08:41:21



Héctor Napoleão Cozendey da Silva (Email: hnsilva@cetiqt.senai.br, CPF: 132.388.197-20) assinou este documento por meio do IP 177.47.105.2 localizado em Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brazil

