

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Jéssica Guimarães Tiburcio



**PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DO PROCESSO DE
ADOÇAMENTO DE GÁS NATURAL**

RIO DE JANEIRO

2025

Jéssica Guimarães Tiburcio

PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DO PROCESSO DE ADOÇAMENTO DE GÁS
NATURAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro de Químico.

Orientador(es): Suzane Borschiver, *D.Sc.*
Daniel Tinôco Neto, *D.Sc.*

Rio de Janeiro
2025

Gerar a página da ficha catalográfica em <http://fichacatalografica.sibi.ufrj.br/> e substituir esta página por ela, no documento final.

Se o documento vier a ser impresso, esta página deverá ser impressa no verso da anterior (folha de rosto).

Jéssica Guimarães Tiburcio

PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DO PROCESSO DE ADOÇAMENTO DE GÁS
NATURAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado em 16 de julho de 2025.

Prof^a. Suzana Borschiver, *D.Sc*, EQ/UFRJ

Prof. Daniel Tinôco Campos Neto, *D.Sc*, EQ/UFRJ

Prof^a. Carla Reis de Araújo, *D.Sc*, EQ/UFRJ

Prof. Renato Cerqueira Guarçoni Baêssso, *D.Sc*, IQ/UERJ

Rio de Janeiro
2025

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ser meu suporte em todos os dias da minha vida.

Aos meus pais, Adriani e Isaías, por sempre batalharem para que eu tivesse condições e oportunidades de um dia vivenciar este momento: a finalização da minha graduação, um importante passo na vida. Agradeço o amor incondicional desde a infância até os dias de hoje.

À minha irmã Juliana, aos meus avós Antonieta e Orlando (*in memoriam*), aos meus tios (Sônia, Ângela, Cristina, Paulo e Celso) e à minha prima Thais por sempre acreditarem em mim e me apoiarem.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro e à Escola de Química, que foram minha segunda casa durante os últimos anos, por me oferecerem educação de excelência.

A todos os professores e colegas que obtive durante a graduação e que foram essenciais para o meu desenvolvimento.

Finalmente, agradeço à Suzana e ao Daniel pela paciência, contribuição e orientação durante os meses de elaboração deste trabalho.

RESUMO

TIBURCIO, Jéssica Guimarães. **Prospecção Tecnológica para Processos de Adoçamento de Gás Natural.** Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

O gás natural (GN) é um combustível fóssil responsável pela emissão de menores quantidades de gases de efeito estufa comparado ao carvão e petróleo, o que o torna promissor no contexto da transição energética. Novas tecnologias de tratamento têm sido desenvolvidas, incluindo a remoção de gás carbônico (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S), o que contribui para a sua aplicação industrial, especialmente reduzindo a corrosão em tubulações e equipamentos e aumentando o seu poder calorífico. Este estudo objetivou avaliar o nível de maturidade tecnológica dos principais processos industriais de adoçamento de GN, com destaque à absorção, adsorção, uso de membranas e criogenia. Por meio de uma metodologia de prospecção tecnológica, um total de 86 artigos científicos e 66 patentes (solicitadas e concedidas) foram selecionados nos bancos de dados da *Scopus* e *Patentscope*, respectivamente, e classificados segundo taxonomias propostas a partir da análise dos documentos, em três níveis de detalhamento (Macro, Meso e Micro). Na análise dos artigos, observou-se um predomínio de tecnologias baseadas em membranas poliméricas (32,5% dos artigos), em que se avaliaram propriedades como permeabilidade (51,2%), seletividade (43,0%) e solubilidade (13,9%) visando à remoção de CO_2 (70,9%) para aplicação eficiente de GN. As universidades dominaram as publicações científicas (76,5%), tendo a China como o principal país responsável pelas investigações avaliadas (25,6%). Na análise de patentes, os resultados foram bastante similares, exceto pela predominância dos Estados Unidos da América como jurisprudência detentora dos pedidos de patentes (34,8%), realizados majoritariamente por empresas e universidades (37,5% cada). Portanto, este estudo evidenciou a importância das membranas para o processo de adoçamento de GN (41,8%), em que benefícios industriais, como eficiência energética, otimização de espaço físico, economia de energia e redução de custos, podem ser alcançados.

Palavras-chave: Gás sulfídrico; Dióxido de carbono; Dessulfurização; Absorção; Adsorção; Membranas; Criogenia.

ABSTRACT

TIBURCIO, Jéssica Guimarães. **Prospecção Tecnológica para Processos de Adoçamento de Gás Natural.** Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Natural gas (NG) is a fossil fuel that emits lower amounts of greenhouse gases compared to coal and oil, making it a promising option in the context of the energy transition. New treatment technologies have been developed, including the removal of carbon dioxide (CO₂) and hydrogen sulfide (H₂S), which contributes to its industrial application—particularly by reducing corrosion in pipelines and equipment and increasing its calorific value. This study aimed to assess the technological maturity level of the main industrial NG sweetening processes, with an emphasis on absorption, adsorption, membrane use, and cryogenics. Using a technology foresight methodology, a total of 86 scientific articles and 66 patents (filed and granted) were selected from the *Scopus* and *Patentscope* databases, respectively, and classified according to taxonomies proposed through document analysis at three levels of detail (Macro, Meso, and Micro). In the analysis of the articles, there was a predominance of technologies based on polymer membranes (32.5% of the articles), which evaluated properties such as permeability (51.2%), selectivity (43.0%), and solubility (13.9%) with the goal of CO₂ removal (70.9%) for efficient NG application. Universities dominated scientific publications (76.5%), with China standing out as the main country responsible for the research evaluated (25.6%). In the patent analysis, the results were quite similar, except for the predominance of the United States as the jurisdiction holding most patent filings (34.8%), primarily by companies and universities (37.5% each). Therefore, this study highlighted the importance of membranes in the NG sweetening process (41.8%), where industrial benefits such as energy efficiency, physical space optimization, energy savings, and cost reduction can be achieved.

Keywords: Hydrogen sulfide; Carbon dioxide; Desulfurization; Absorption. Adsorption. Membranes. Cryogenics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Esquema da origem do gás natural	20
Figura 2.2 - Histórico de produção do carvão mineral, petróleo e gás natural de 1990 a 2020	21
Figura 2.3 - Matriz energética mundial em 2022	22
Figura 2.4 - Histórico da produção de gás natural, em milhões de metros cúbicos	23
Figura 2.5 - Consumo mundial de gás natural, em bilhões de metros cúbicos	24
Figura 2.6 - Previsão para a demanda mundial de energia primária até 2040	24
Figura 2.7 - Organização da atividade de distribuição de gás natural	27
Figura 2.8 - Reservas totais de gás natural, em milhões de metros cúbicos, no período de 2014-2023	28
Figura 2.9 - Reservas provadas de gás natural, em milhões de metros cúbicos	29
Figura 2.10 - Histórico de produção de gás natural, em milhões de metros cúbicos, no período de 2014-2023	29
Figura 2.11 - Esquema da cogeração de energia a partir do gás natural	34
Figura 2.12 - Esquema das atividades de cada parte da cadeia produtiva do gás natural	36
Figura 2.13 - Representação típica de um vaso separador gás-líquido	37
Figura 2.14 - Sistema de compressão principal de gás natural em três estágios	38
Figura 2.15 - Diagrama de processo de uma unidade de desidratação de gás natural utilizando trietilenoglicol glicol (TEG)	39
Figura 2.16 - Secção de tubulação com empolamento pelo H ₂ ocasionado por gás sulfídrico e umidade	40
Figura 2.17 - Pictogramas do gás sulfídrico	41
Figura 2.18 - Efeitos da exposição de H ₂ S no corpo humano	41
Figura 2.19 - Estruturas químicas das alanolaminas utilizadas nos processos de adoçamento de gás natural	42
Figura 2.20 - Fluxograma do processo de adoçamento de gás natural com amina	43
Figura 2.21 - Esquema da separação de gases ácidos do gás natural por membranas	45
Figura 2.22 - Esquema de adsorção dos gases ácidos presentes no gás natural	46
Figura 2.23 - Fluxograma de separação de gás natural por destilação criogênica pelo processo <i>Controlled Freeze Zone™</i> (CFZ™)	47

Figura 2.24 - Especificação do Gás Natural segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)	45
Figura 4.1 - Metodologia de prospecção tecnológica	50
Figura 5.1 - Progressão temporal dos artigos	55
Figura 5.2 - Quantidade de artigos científicos publicados por país no período de 2015-2025 (maio) segundo dados da <i>Scopus (Elsevier)</i>	56
Figura 5.3 - Consumo de energia primária na China entre 2004 e 2018	58
Figura 5.4 - Previsão para a produção de energia nos Estados Unidos, em BTU	59
Figura 5.5 - Distribuição de universidades, institutos de pesquisa e empresas dos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025 (maio)	61
Figura 5.6 - Vantagens para empresas e ICTs com a transferência de conhecimento	65
Figura 5.7 - Distribuição dos artigos entre as taxonomias Meso	66
Figura 5.8 - Principais tecnologias de adoção de gás natural reportadas nos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025	69
Figura 5.9 - Quantidade de impactos abordados nos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025	73
Figura 5.10 - Distribuição dos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025 que abordaram apenas um tipo de impacto	73
Figura 5.11 - Distribuição dos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025 em função dos métodos de absorção	76
Figura 5.12 - Distribuição dos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025 em função dos métodos de adsorção	78
Figura 5.13 - Distribuição dos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025 em função dos métodos de separação por membranas	78
Figura 5.14 - Distribuição dos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025 em função dos poluentes removidos do gás natural	84
Figura 5.15 - Gases poluentes abordados nos artigos selecionados na base <i>Scopus (Elsevier)</i> no período 2015-2025	84
Figura 5.16 - Esquema do processo de captura e armazenamento de carbono em uma planta de produção de gás natural	85
Figura 5.17 - Distribuição das patentes entre concedidas e solicitadas, selecionadas no <i>Patentscope (WIPO)</i> no período de 2015-2025 (abril)	87

Figura 5.18 - Quantidade de patentes solicitadas, concedidas e totais por ano, selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril)	88
Figura 5.19 - Escritório de patentes (jurisdição) dos documentos selecionados no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril)	89
Figura 5.20 - Distribuição de patentes desenvolvidas por universidades, institutos de pesquisa, órgãos governamentais e empresas, selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril)	90
Figura 5.21 - Distribuição dos artigos entre as taxonomias Meso	92
Figura 5.22 - Distribuição das patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) em função dos principais métodos de adoçãoamento de gás natural	95
Figura 5.23 - Tipos de impacto abordados nas patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril)	98
Figura 5.24 - Distribuição das patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) em função dos métodos de absorção	100
Figura 5.25 - Distribuição das patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) em função dos métodos de adsorção	101
Figura 5.26 - Distribuição das patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) em função dos métodos de separação por membranas	103
Figura 5.27 - Distribuição das patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) em função dos poluentes presentes no gás	105
Figura 5.28 - Gases poluentes abordados nas patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril)	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Os maiores produtores de gás natural em 2022	23
Quadro 2.2 - Responsabilidades da União e dos estados na cadeia produtiva do gás natural .	26
Quadro 2.3 - Emenda constitucional nº 5, promulgada em 1995	26
Quadro 2.4 - Emenda constitucional nº 9, promulgada em 1995	26
Quadro 2.5 - Lista de concessionários de gás natural no Brasil em 2023	30
Quadro 2.6 - Maiores estados produtores de gás natural do Brasil, em milhões de metros cúbicos, em 2023	31
Quadro 2.7 - Comparaçao entre combustíveis em termelétricas com capacidade de 450 MW	34
Quadro 2.8 - Composição do gás natural bruto conforme localidade de produção no Brasil .	37
Quadro 2.9 - Comparativo entre as aminas monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) e metildietanolamina (MDEA) utilizadas no adoçamento de gás natural	43
Quadro 4.1 - Estratégia de busca dos artigos na plataforma <i>Scopus</i> (Elsevier)	52
Quadro 4.2 - Estratégia de busca dos artigos na plataforma <i>Patentscope</i> (WIPO), usando a seção “página principal” e análise das “reivindicações”	54
Quadro 5.1 - Análise Meso dos artigos selecionados na base <i>Scopus</i> (Elsevier) no período 2015-2025	66
Quadro 5.2 - Análise Micro dos artigos selecionados na base <i>Scopus</i> (Elsevier) no período 2015-2025	68
Quadro 5.3 - Número de artigos selecionados na base <i>Scopus</i> (Elsevier) no período 2015-2025 que citam as principais propriedades físico-químicas relacionadas ao adoçamento de gás natural	83
Quadro 5.4 - Análise Micro das patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril)	94
Quadro 5.5 - Vantagens e desvantagens dos métodos de absorção, adsorção, membranas e criogenia	96
Quadro 5.6 - Impactos avaliados nas patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril)	97
Quadro 5.7 - Número de patentes selecionadas no <i>Patentscope</i> (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) que abordaram propriedades físico-químicas relacionadas ao adoçamento de gás natural	103
Quadro 5.8 - Resultados do estudo prospectivo	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Resultados da busca estratégica de artigos no <i>Scopus (Elsevier)</i> no período de 2015-2025 (maio), usando como critério de busca a seção abstract	55
Tabela 5.2 - Resultado da busca estratégica de patentes no <i>Patentscope (WIPO)</i> no período de 2015-2025 (abril), usando como critério a seção “página inicial” e analisando a seção “reivindicações”	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C1	Metano
C2	Etano
C3	Propano
C4	Butano
C4+	Hidrocarbonetos com 4 ou mais carbonos
C5	Pentano
C5+	Hidrocarbonetos com 5 ou mais carbonos
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>
CFZ™	<i>Controlled Freeze Zone™</i>
COP-21	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015
DEA	Dietanolamina
DES	Solventes Eutéticos Profundos
DIPA	Di-isopropilamina
DMSO	Dimetilsulfóxido
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GNC	Gás Natural Comprimido
GNV	Gás Natural Veicular
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
ICT	Instituto e Centro de Tecnologia
MDEA	Metildietanolamina
MEA	Monoetanolamina
MME	Ministério de Minas e Energia
MMM	Membrana de Matriz Mista
MOF	<i>Metal-Organic Framework</i>
ppm	Partes por milhão
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural
UTG	Unidade de Tratamento de Gás

LISTA DE SÍMBOLOS

Am	Área da membrana (m^2)
cP	<i>Centipoise</i>
% mol	Concentração molar (porcentagem molar)
% p/p	Concentração mássica (porcentagem peso por peso)
% v/v	Concentração volumétrica (porcentagem volume por volume)
ΔP	Diferencial entre a pressão do permeado e a pressão do tubo de entrada (bar)
δ	Espessura da membrana (m)
J_i	Fluxo do componente i por meio da membrana (kmol/s)
P_i	Permeabilidade do componente i (kmol.m/(s.m ² .bar))
MW	Potência (Megawatt)
t/dia	Tonelada por dia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 GÁS NATURAL	20
2.1.1 Composição do gás natural.....	20
2.1.2 Panorama mundial	21
2.1.3 O gás natural no Brasil	25
2.1.4 Aplicações	32
2.1.4.1 Setor automotivo	32
2.1.4.2 Setores residencial e comercial.....	33
2.1.4.3 Setor industrial.....	33
2.1.4.4 Setor elétrico.....	33
2.1.4.5 Cogeração	34
2.2 CADEIA PRODUTIVA	35
2.3 SEPARAÇÃO DOS COMPONENETS DO PETRÓLEO BRUTO	36
2.3.1 Separação do gás associado ao óleo	36
2.3.2 Tratamento de gás	37
2.3.2.1 Unidade de Compressão Principal.....	38
2.3.2.2 Unidade de Desidratação de Gás	39
2.4 ADOÇAMENTO DE GÁS NATURAL	40
2.4.1 Gases ácidos	40
2.4.2 Processo tradicional de dessulfurização de gás natural.....	42
2.4.2.1 Aminas.....	42
2.4.2.2 Descrição do processo	43
2.4.3 Outros processos de adoçamento de gás natural	45
2.5 RESOLUÇÃO N° 982, 2025.....	47
3 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA	49

4 METODOLOGIA.....	50
4.1 LEVANTAMENTO DE ARTIGOS	51
4.1.1 Etapa pré-prospectiva	51
4.1.2 Etapa prospectiva	52
4.1.2.1 Base de dados	52
4.1.2.2 Busca estratégica	52
4.1.2.3 Análise dos resultados	52
4.2 LEVANTAMENTO DE PATENTES.....	53
4.2.1 Etapa pré-prospectiva	53
4.2.2 Etapa prospectiva	53
4.2.2.1 Banco de dados	53
4.2.2.2 Busca estratégica	54
4.2.2.3 Análise dos resultados	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 ANÁLISE DOS ARTIGOS.....	55
5.1.1 Análise Macro	55
5.1.1.1 Análise temporal.....	55
5.1.1.2 Análise geográfica	56
5.1.1.3 Análise acadêmica e empresarial.....	61
5.1.2 Análise Meso	66
5.1.3 Análise Micro	67
5.1.3.1 Análise Micro I.....	69
5.1.4 Análise Micro II	74
5.1.4.1 Tecnologias de Absorção.....	74
5.1.4.2 Tecnologias de Adsorção.....	76
5.1.4.3 Tecnologias de Membranas	78
5.1.4.4 Propriedades físico-químicas.....	80
5.1.4.5 Gases ácidos poluentes	83
5.2 ANÁLISE DAS PATENTES.....	86
5.2.1 Análise Macro	87
5.2.1.1 Análise da classificação das patentes	87
5.2.1.2 Análise temporal.....	88
5.2.1.3 Análise geográfica	88
5.2.1.4 Análise acadêmica e empresarial.....	90

5.2.2 Análise Meso	91
5.2.3 Análise Micro	93
5.2.3.1 Análise Micro I.....	95
5.2.4 Análise Micro II.....	99
5.2.4.1 Tecnologias de Absorção.....	99
5.2.4.2 Tecnologias de Adsorção.....	100
5.2.4.3 Tecnologias de Membranas	101
5.2.4.4 Propriedades físico-químicas.....	103
5.2.4.5 Gases ácidos poluentes	105
5.3 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS ENCONTRADOS	106
6 CONCLUSÃO.....	108
7 TRABALHOS FUTUROS.....	110
8 REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O gás natural (GN) é um combustível fóssil formado majoritariamente por metano, contendo também hidrocarbonetos leves, como etano, propano, butano e pentano. Além disso, é comum que se tenham poluentes como gás carbônico e sulfeto de hidrogênio (chamados gases ácidos). Entretanto, a composição do gás natural varia em cada reservatório e localidade (SPEIGHT, 2018). Por muito tempo, foi considerado apenas um subproduto da produção de petróleo, porém, nos últimos anos tem se aproximado de uma *commodity* (SANTOS *et al.*, 2021, VELHOS, 2018).

O destaque do GN frente a outros combustíveis é atribuído a alguns fatores, como a sua aplicação em diferentes setores econômico-produtivos (automotivo, residencial, industrial e comercial) (BARCELOS, 2023), alta confiabilidade energética, menor emissão de gases de efeito estufa se comparado ao petróleo e ao carvão mineral, que são combustíveis fósseis amplamente utilizados por países como a China (ZHANG *et al.*, 2020), aumento da demanda energética mundial e existência de reservas ainda não exploradas (WEIKERT, 2021). Portanto, é necessário que os processos integrantes da cadeia produtiva do GN sejam cada vez mais seguros e eficientes.

Uma das etapas do processamento de GN é o adoçamento (*sweetening*), em que são removidos gás sulfídrico (H_2S) e dióxido de carbono (CO_2), considerados gases ácidos. Essa remoção objetiva a viabilização do processamento e a redução de emissões prejudiciais e danos. Atualmente, quatro processos são os mais utilizados para este fim: absorção, adsorção, permeação por membranas e separação criogênica (RAHIMPOUR, MAKAREM, MESHKSAR, 2024). A absorção é o processo mais comum e consiste na passagem do gás natural rico em poluentes em uma coluna de absorção em contracorrente com uma solução de aminas. A solução de aminas, cuja escolha é fundamental no projeto da coluna, absorve esses gases, removendo-os do GN e tornando-o um gás doce dentro da especificação desejada (WEIKERT, 2021).

Nesse contexto, este trabalho objetivou avaliar o nível de desenvolvimento tecnológico das principais técnicas de adoçamento de GN aplicadas industrialmente, para uma melhor compreensão das tendências e gargalos do processo. Por meio de uma metodologia baseada em análise em múltiplos níveis, foi possível determinar os atores, países e instituições dominantes das tecnologias, bem como as taxonomias mais representativas da dessulfurização de GN. Com

isso, estratégias futuras podem ser aplicadas para viabilizar o GN no mercado mundial, enquanto um combustível de menor impacto ambiental e alta confiabilidade energética.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o nível de maturidade tecnológica dos principais processos industriais de adoçamento de gás natural (GN) empregados na indústria de óleo e gás.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Propor taxonomias que representem os principais aspectos tecnológicos envolvidos no processo industrial de adoçamento de GN, especialmente em termos de produto, tecnologia e impacto de mercado, com o intuito de compreender o cenário atual e identificar potenciais oportunidades de inovação;
- Realizar uma análise preliminar das taxonomias propostas, correlacionando as informações selecionadas sobre o adoçamento de GN com questões emergentes sobre mudanças climáticas e eficiência energética;
- Identificar os principais atores do processo de adoçamento de GN, seus países de origem, jurisdição de patentes, instituições envolvidas (incluindo parcerias) e evolução temporal.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso foi estruturado em sete capítulos. No capítulo 1, uma contextualização do tema foi apresentada, destacando-se a visão geral, a problemática e a importância dos processos de adoçamento de gás natural (GN). Além disso, a motivação para a elaboração deste trabalho foi apresentada e os objetivos geral e específicos foram definidos, seguido da disposição dos capítulos com uma breve descrição de cada um deles.

No capítulo 2, a fundamentação teórica do objeto de estudo foi apresentada, expondo o panorama desse combustível fóssil no mundo e no Brasil, passando pelas questões ambientais, econômicas e regulatórias. Além disso, foi justificado o motivo do crescente uso de GN com base em suas principais aplicações produtivo-econômicas. Ainda nesse capítulo, uma

explicação sobre o processo de separação de óleo cru (emulsão) foi reportada, incluindo as etapas tradicionalmente empregadas no adoçamento de GN. O capítulo foi finalizado com as regras para a venda de GN no Brasil, segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) N°982, 2025.

No capítulo 3, um breve detalhamento foi realizado sobre a metodologia de prospecção tecnológica, ferramenta usada neste trabalho.

No capítulo 4, essa metodologia foi apresentada e explicada. A estratégia de busca, banco de dados, e análises multiníveis foram detalhados.

No capítulo 5, análises dos artigos e patentes selecionados com base no foco deste estudo foram realizadas. Os documentos foram classificados em categorias (recorte temporal, geográfico e acadêmico), e taxonomias foram propostas para representar os principais aspectos tecnológicos envolvidos no adoçamento de GN.

No capítulo 6, a conclusão deste trabalho foi apresentada, retomando os principais pontos verificados ao longo do estudo e correlacionando as observações feitas com os objetivos propostos.

Por fim, uma sugestão de trabalhos futuros foi apresentada no capítulo 7.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GÁS NATURAL

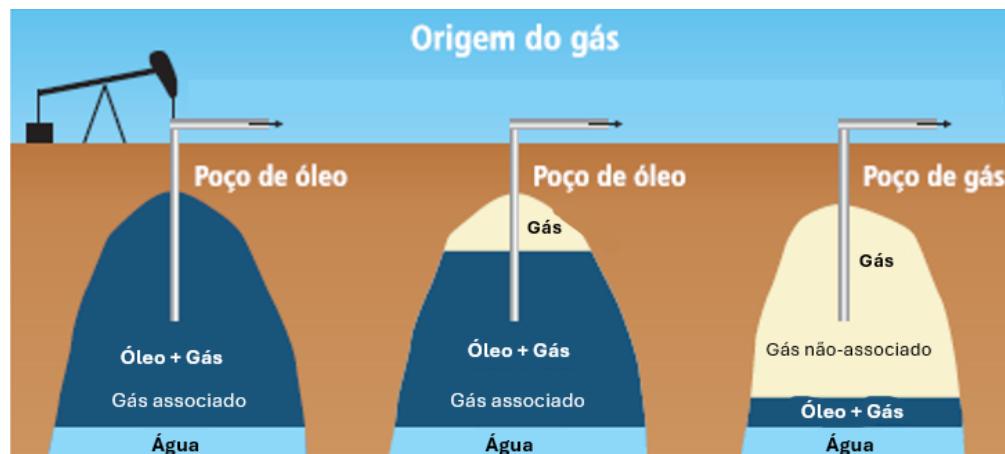
2.1.1 Composição do gás natural

O gás natural (GN) é uma mistura inflamável de gases leves, formado por metano (C1), etano (C2), propano (C3), butano (C4), pentano (C5), hidrocarbonetos mais pesados (C5+) e alguns compostos orgânicos e inorgânicos em pequenas concentrações, como benzeno, xileno, tolueno, gás carbônico (CO₂), gás sulfídrico (H₂S), monóxido de carbono (CO), gás hidrogênio (H₂) e gases nobres, que, a temperatura ambiente, não apresenta cor nem odor. A quantidade de metano no GN pode chegar a 90% em volume, sendo, por isso, o seu principal componente (REIS *et al.*, 2018). A composição de GN é variável, dependendo das condições de produção, da mudança de pressão à medida que o gás é retirado do reservatório e das características do reservatório (SPEIGHT, 2018, BARCELOS, 2023).

A formação do gás natural ocorre naturalmente por meio da degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbias, sob temperatura e pressão elevadas, e como resultado da alteração térmica de hidrocarbonetos líquidos, no decorrer de milhões de anos (WEIKERT, 2021).

O gás natural oriundo de poços de petróleo é geralmente denominado “gás associado”, podendo existir separadamente, como “gás livre”, ou dissolvido no óleo bruto, como “gás dissolvido”. Ao contrário, quando produzido a partir de poços de gás e condensados, no qual existe pouco ou nenhum óleo bruto, é denominado “gás não associado” (MALESKI, RITTER, 2021).

Figura 2.1 – Esquema da origem do gás natural.



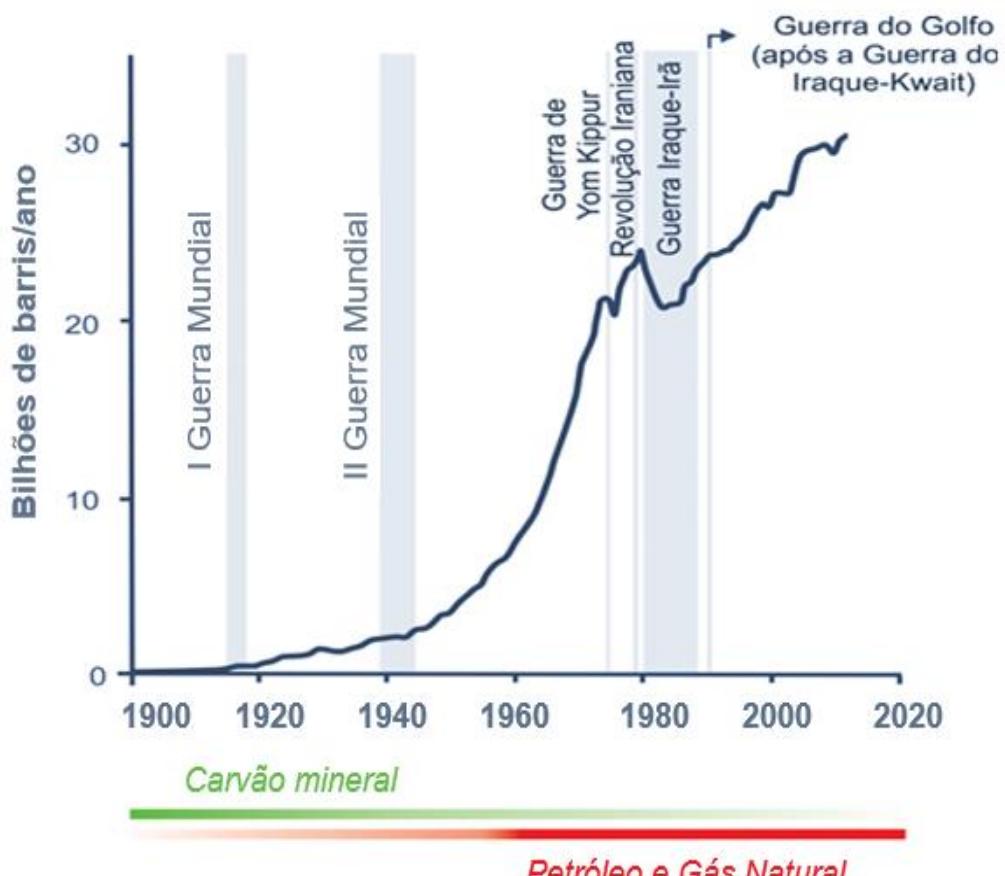
Fonte: Adaptado de SACRAMENTO (2023).

2.1.2 Panorama mundial

A ascensão da Revolução Industrial no século XIX culminou na elevada demanda de combustível de origem fóssil em oposição ao uso de óleo de baleia, que estava se tornando mais raro naquele momento. O óleo de baleia era utilizado para a fabricação de tintas e vernizes, iluminação e confecção de tecidos. Com o desenvolvimento econômico e a implementação de novas tecnologias, resultantes das mudanças que o mundo enfrentava na época, a dependência mundial de hidrocarbonetos líquidos e gasosos aumentou. O uso de motores a combustão interna, que ofereciam maior conversão energética, cresceu consideravelmente, elevando a demanda por esses tipos de hidrocarbonetos (REIS *et al.*, 2018).

O crescimento acelerado dos combustíveis fósseis, embora iniciado na Europa, foi rapidamente adotado por vários países e regiões, mais especificamente pelos Estados Unidos, Rússia e Oriente Médio (REIS *et al.*, 2018). A partir dos anos 1960, o petróleo já representava a principal fonte energética do mundo, como verificado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Histórico de produção do carvão mineral, petróleo e gás natural de 1990 a 2020.



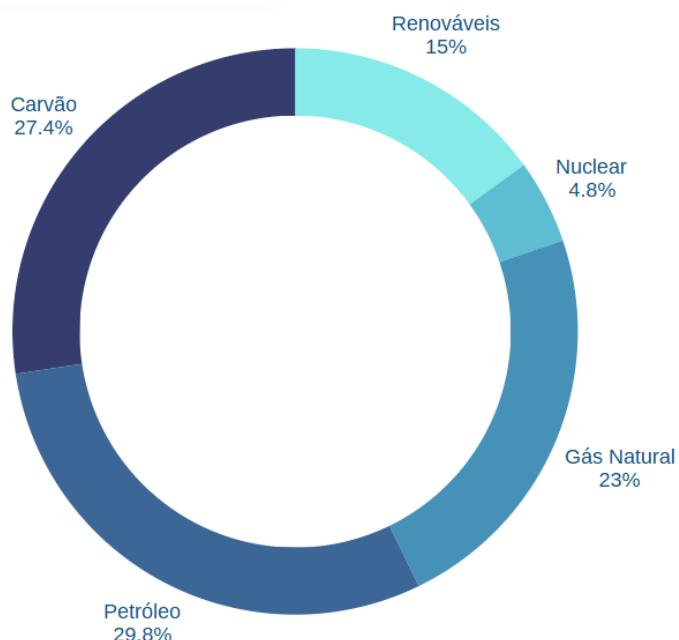
Fonte: REIS *et al.* (2018).

A partir dos anos 2000, o declínio do uso do carvão e fontes de hidrocarbonetos não convencionais acentuou-se, sendo liderado pelos Estados Unidos. Como resultado, o gás natural foi posto em uma posição mais favorável no contexto mundial, especialmente por ser um combustível fóssil mais limpo em comparação ao carvão mineral e ao petróleo (SLAUGHTER, 2013).

O gás natural apresenta uma menor emissão de carbono dentre os combustíveis fósseis, fator ambiental determinante para a sua utilização no contexto das mudanças climáticas. As emissões de gases do efeito estufa que o gás natural causa são, em média, 43 e 30% menores que as de carvão mineral e petróleo, respectivamente. Ademais, na COP 21 (ou Acordo de Paris), ocorrida em 2015, foi enfatizada a sua importância como fonte de energia, em conjunto com fontes renováveis, para um mundo em que a economia de baixo carbono ditaria o ritmo das inovações tecnológicas. Os países signatários, totalizando 195, àquele momento, firmaram um compromisso para empenho em assumir os acordos firmados na reunião. Somado a isso, outros fatores que têm justificado a sua importância na matriz energética mundial são a segurança energética, ausência de custos adicionais e eficiência, que pode alcançar uma taxa de conversão de energia de mais de 60% (GUTIERREZ, 2022).

Atualmente, o gás natural é o terceiro combustível fóssil mais consumido no mundo, conforme dados da matriz energética mundial apresentados pela *IEA* (do inglês, Agência Internacional de Energia) (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Matriz energética mundial em 2024.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de *International Energy Agency* (2025).

Os maiores produtores de gás natural são os Estados Unidos (23%), Rússia (17%), Irã (6%), China (5%) e Catar (5%). O Quadro 2.1 apresenta os dez principais países produtores em 2022.

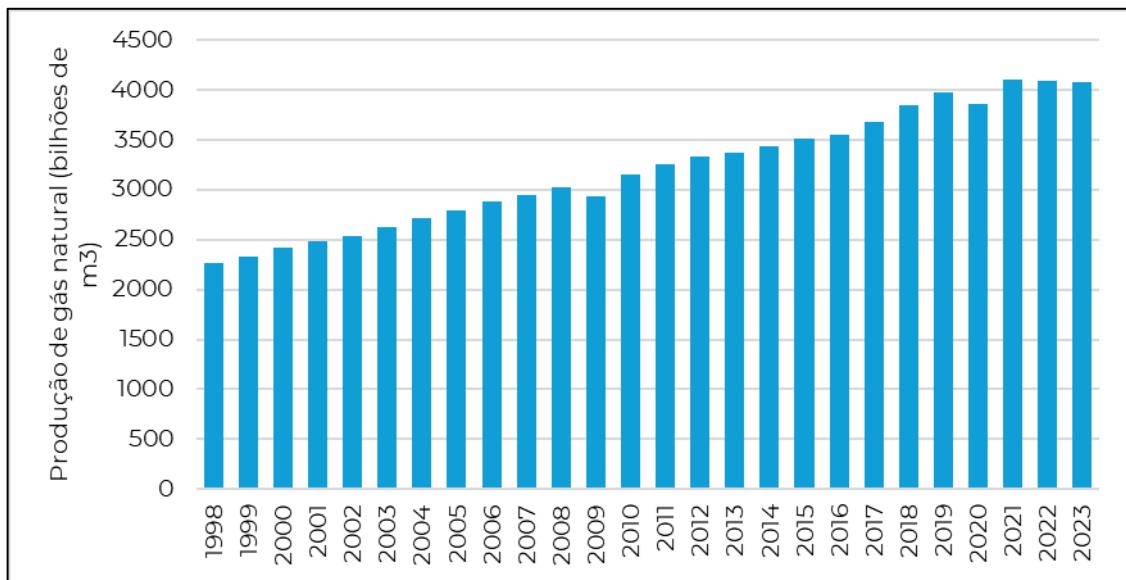
Quadro 2.1 – Os maiores produtores de gás natural em 2021.

Maiores produtores de gás natural, em bilhões de metros cúbicos.									
EUA	Rússia	Irã	China	Catar	Canadá	Austrália	Arábia Saudita	Noruega	Argélia
934	702	257	209	177	172	147	117	114	101

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (2022a).

A respeito do panorama produtivo, a Figura 2.4 ilustra como a produção de gás natural se comportou no período de 1998 a 2023, quando a produção alcançou a marca de 4081 bilhões de metros cúbicos (STATISTA, 2025b). Nota-se que a produção deste combustível, há pelo menos 15 anos, mesmo diante de algumas oscilações ocorridas em 2009 e 2020, apresenta um comportamento crescente.

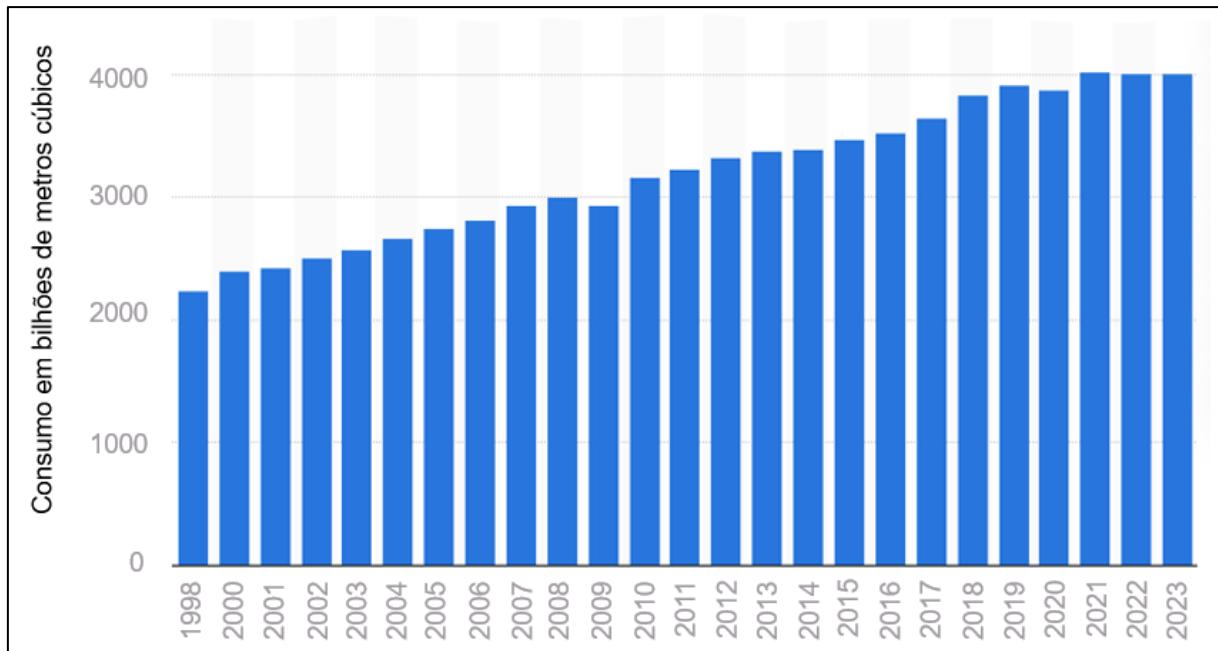
Figura 2.4 – Histórico da produção de gás natural, em milhões de metros cúbicos.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de STATISTA (2025b).

Dentre os consumidores, os Estados Unidos também lideram o *ranking*, seguidos por Rússia, China, Irã e Canadá (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2022b). Em 2023, o consumo mundial de gás natural foi de aproximadamente 4010 bilhões de metros cúbicos (STATISTA, 2024a). A Figura 2.5 mostra a evolução de 1998 a 2023.

Figura 2.5 – Consumo mundial de gás natural, em bilhões de metros cúbicos.

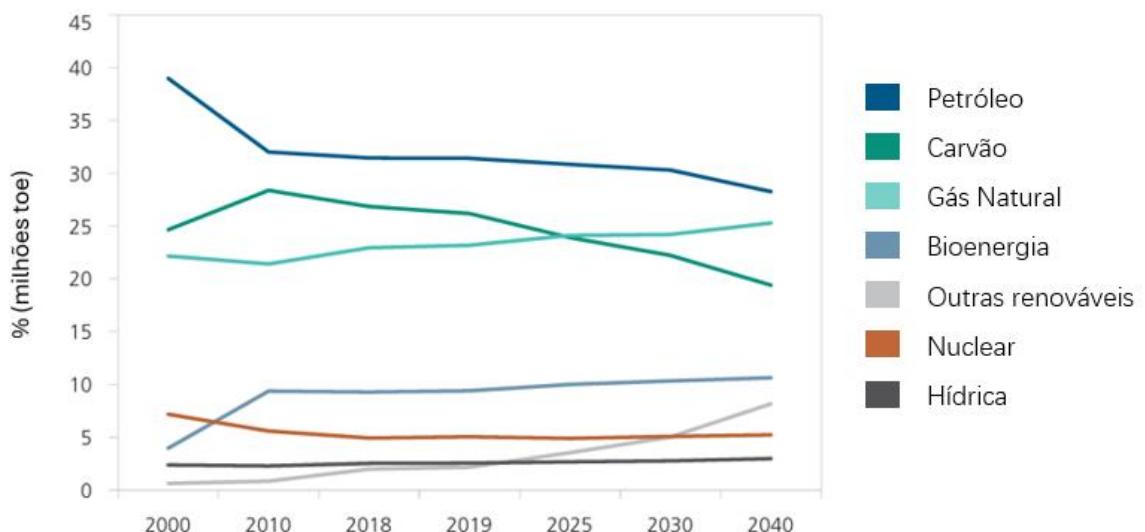


Fonte: Elaboração própria a partir de dados de STATISTA (2024a).

Segundo dados do IEA de 2020, o gás natural deverá ocupar o segundo lugar na matriz energética mundial devido ao declínio esperado para o carvão a partir de meados de 2030 (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

A Figura 2.6 resume a demanda mundial de energia primária prevista para diferentes fontes de energia, incluindo o gás natural, carvão, petróleo, bioenergia, e energias nuclear, hídrica e renováveis de 2000 a 2040.

Figura 2.6 – Previsão para a demanda mundial de energia primária até 2040.



Fonte: Adaptado de TEIXEIRA *et al.* (2021).

Observa-se a tendência de queda do petróleo e do carvão, em oposição ao gás natural. Além disso, outros destaques são as energias renováveis, que ainda apresentam uma demanda embrionária, porém uma forte tendência de crescimento dados os desafios climáticos atualmente impostos.

2.1.3 O gás natural no Brasil

Até os anos 1990, a produção de gás natural no Brasil era ínfima. O principal produto energético era o petróleo e suas jazidas eram descobertas a cada dia. O gás natural era encontrado na sua forma associada e sua produção era apenas complementar à produção de óleo. Além disso, o mercado de gás estava concentrado nos estados da Bahia, do Rio de Janeiro e de São Paulo (RIBEIRO, 2017).

A situação mudou quando foi construído o gasoduto Brasil-Bolívia (Gasbol). O projeto se iniciou em 1991, quando Petrobras, *Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos* (ou YfPB, uma estatal boliviana do setor petroleiro) e o Ministério de Energia e Hidrocarburetos (Bolívia) firmaram uma parceria para a integração energética entre os dois países. Nos anos seguintes, houve a definição do traçado do gasoduto, o plano de comercialização e o tratado para importação. O primeiro trecho, que passava pelas cidades de Corumbá (MS), Paulínia (SP) e Guararema (SP), começou a ser operado no final desta década, em 1999 (RIBEIRO, 2017). Outro fator impulsionador desta nova indústria foi a descoberta de gás não associado na Bacia de Santos, a maior produtora do país (GUTIERREZ, 2022).

A questão regulatória do gás natural também teve peso no seu desenvolvimento. Foi proposto que a regulação da cadeia produtiva de gás natural fosse de responsabilidade da União e dos estados, com base nas leis nº 9.478/1997 (Lei do Petróleo) e nº 11.909/2009 (Lei do Gás Natural). A primeira lei retirou o monopólio da Petrobras desta atividade e definiu o gás natural como um subproduto do petróleo. Por não considerar a indústria de gás natural como fonte primária de energia, foi necessária a promulgação da segunda lei, em 2009. Dentre as principais medidas implementadas pela Lei do Gás Natural, estavam o acesso de terceiros aos gasodutos e a separação das atividades de comercialização, potencialmente concorrencial, das atividades de transporte e distribuição, caracterizadas por monopólios naturais (FREITAS, ALMEIDA, 2024; SANTOS *et al.*, 2021).

As principais responsabilidades da cadeia produtiva de GN para a União e para as unidades federativas estão apresentadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Responsabilidades da União e dos estados na cadeia produtiva do gás natural.

União	Estados
<ul style="list-style-type: none"> - Exploração e produção; - Escoamento; - Importação; - Processamento / tratamento; - Transporte; - Estocagem; - Comercialização; - Distribuição de GNC (gás natural comprimido) e GNL (gás natural liquefeito). 	<ul style="list-style-type: none"> - Distribuição de gás natural canalizado.

Fonte: Adaptado de DUTRA, RODRIGUES, LISBONA (2019).

Além disso, em 1995, duas emendas constitucionais (a quinta e a nona) promoveram a abertura dos estados para a exploração de gás feita por iniciativas privadas. Essas duas emendas constitucionais estão apresentadas nos Quadro 2.3 e 2.4.

Quadro 2.3 - Emenda constitucional nº 5, promulgada em 1995.

EMENDA CONSTITUCIONAL Nº 5, DE 15 DE AGOSTO DE 1995

Altera o § 2º do art. 25 da Constituição Federal.

As Mesas da Câmara dos Deputados e do Senado Federal, nos termos do § 3º do art. 60 da Constituição Federal, promulgam a seguinte emenda ao texto constitucional:

Artigo único. O parágrafo 2º do art. 25 da Constituição Federal passa a vigorar com a seguinte redação:
"Cabe aos Estados explorar diretamente, ou mediante concessão, os serviços locais de gás canalizado, na forma da lei, vedada a edição de medida provisória para a sua regulamentação."

Brasília, 15 de agosto de 1995.

Fonte: BRASIL (1995a).

Quadro 2.4 -Emenda constitucional nº 9, promulgada em 1995.

EMENDA CONSTITUCIONAL Nº 9, DE 1995

Dá nova redação ao art. 177, da Constituição Federal,
alterando e inserindo parágrafos.

As Mesas da Câmara dos Deputados e do Senado Federal, nos termos do § 3º art. 60, da Constituição Federal, promulgam a seguinte Emenda ao texto constitucional:

Art. 1º O § 1º do art. 177 da Constituição Federal passa a vigorar com a seguinte redação:

"Art.177.

§ 1º A União poderá contratar com empresas estatais ou privadas a realização das atividades previstas nos incisos I a IV deste artigo observadas as condições estabelecidas em lei."

Art. 2º Inclua-se um parágrafo, a ser enumerado como § 2º com a redação seguinte, passando o atual § 2º para § 3º, no art. 177 da Constituição Federal:

"Art.177.....

§ 2º A lei a que se refere o § 1º disporá sobre:

I - a garantia do fornecimento dos derivados de petróleo em todo o território nacional;

II - as condições de contratação;

III - a estrutura e atribuições do órgão regulador do monopólio da União."

Art. 3º É vedada a edição de medida provisória para a regulamentação da matéria prevista nos incisos I a IV e dos §§ 1º e 2º do art. 177 da Constituição Federal.

Brasília, 9 de novembro de 1995.

Fonte: BRASIL (1995b).

Por meio dessas emendas, alguns estados como Rio de Janeiro e São Paulo outorgaram a atividade para empresas privadas, enquanto os outros preferiram a escolha por sociedades com economias mistas (DUTRA, RODRIGUES, LISBONA, 2017). A Figura 2.7 apresenta a organização atual da atividade relacionada ao gás natural nos estados brasileiros.

Figura 2.7 - Organização da atividade de distribuição de gás natural.

Entidade responsável pela Regulação Estadual	Natureza do Prestador de Serviço	Estados			
Agência Reguladora	Companhia privada	Rio de Janeiro		São Paulo *	
		Alagoas	Goiás	Pernambuco	
		Amazonas	Maranhão	Piauí	
	Sociedade de Economia Mista	Bahia	Mato Grosso	Rio Grande do Norte	
		Ceará	Mato Grosso do Sul	Santa Catarina	
		Distrito Federal	Paraíba	São Paulo *	
		Espírito Santo	Paraná	Sergipe	
Secretaria de Estado	Sociedade de Economia Mista		Rio Grande do Sul		
Secretaria de Estado			Minas Gerais		

* A Comgás (SP) e a Naturgy (GNSPS/SP) são companhias privadas e a GasBrasiliano (SP) é sociedade de economia mista.

Fonte: DUTRA, RODRIGUES, LISBONA (2019).

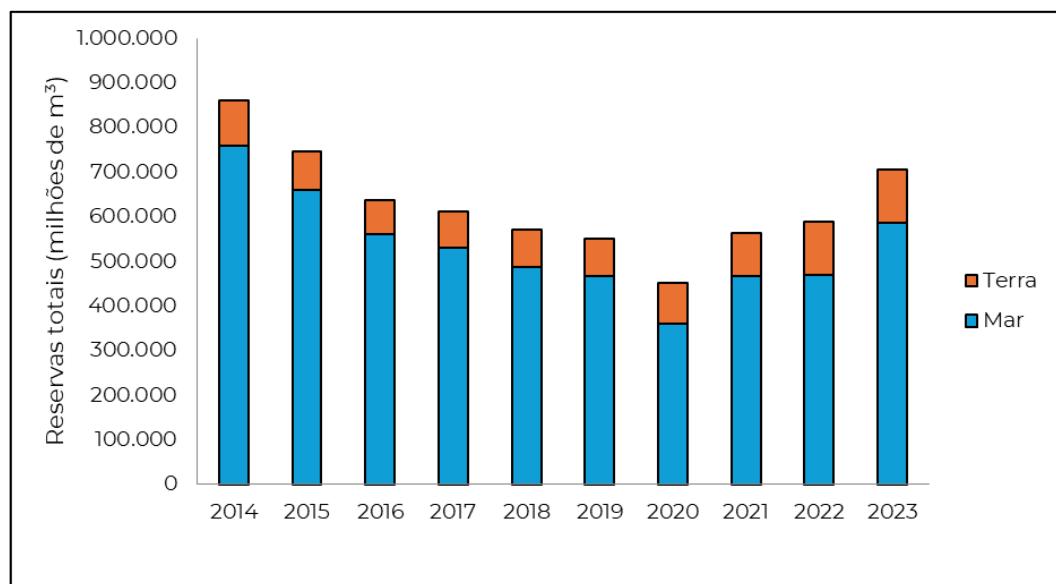
Em 2021, com a pretensão de expandir ainda mais o setor e liberalizar o mercado, foi promulgada uma lei batizada de Nova Lei do Gás (nº 14.134/2021), objetivando a atração de investimentos, aumento da concorrência na comercialização do GN e redução do preço final para os consumidores (ANP, 2024a).

Entretanto, mesmo com essas medidas de abertura e a necessidade de maior regulação da atividade produtiva do GN, este combustível representa, no Brasil, menos de 15% da matriz energética, ainda liderada pelo petróleo (GUTIERREZ, 2022). Esse fato pode ser justificado pela reinjeção de gás natural em poços, como *gas lift*, ou ainda pela estrutura do licenciamento ambiental brasileiro ser fragmentado entre os estados, criando uma insegurança jurídica (ARAÚJO, FELIX, 2024).

Atualmente, o Brasil conta com 704,7 bilhões de metros cúbicos em reservas totais, um aumento de 19,9% em relação ao ano anterior. As reservas provadas totalizam 517,1 bilhões de metros cúbicos, um aumento de aproximadamente 27,2% em relação a 2022 (ANP, 2024b).

A Figura 2.8 apresenta a capacidade das reservas totais de gás natural de 2014 a 2023, segundo o tipo de reservatório (mar ou terra).

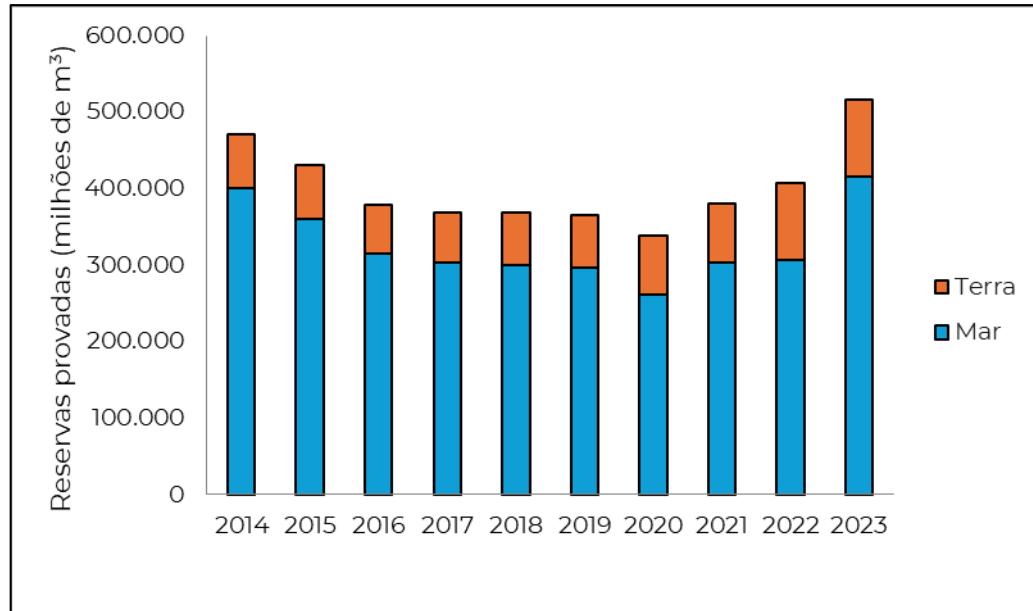
Figura 2.8 - Reservas totais de gás natural, em milhões de metros cúbicos, no período de 2014-2023.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANP (2024b), no período de 2014-2023.

Já a Figura 2.9 apresenta a capacidade das reservas provadas de acordo com os tipos de reservatório (mar e terra) a cada ano durante o mesmo período (2014-2023).

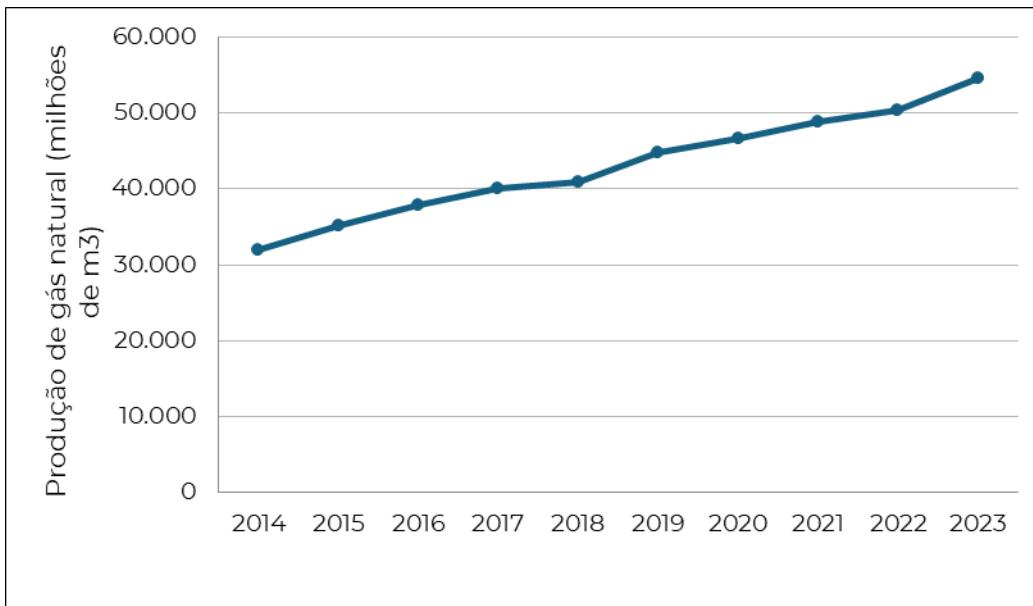
Figura 2.9 – Reservas provadas de gás natural, em milhões de metros cúbicos.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANP (2024b), no período de 2014-2023.

Segundo os dados do anuário de 2024 da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), pelo 13º ano consecutivo, o Brasil apresentou um aumento de sua produção, tendo superado 54 bilhões de metros cúbicos de gás associado e não associado no ano de 2023, conforme observado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Histórico de produção de gás natural, em milhões de metros cúbicos, no período de 2014-2023.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de ANP (2024b).

Essa produção de mais de 54 bilhões de metros cúbicos no ano de 2023 foi dividida entre 78 concessionários, atuando em onze estados brasileiros. A Petrobras liderou a lista, produzindo cerca de 36 bilhões de metros cúbicos, dado que representou 66% do total. Em segundo, aparece a *Shell Brasil* (11%), seguida de *TotalEnergies EP* (3,9%), *Petrogal Brasil* (3%) e *Repsol Sinopec* (2,2%) (ANP, 2024b).

A lista com todos os concessionários no Brasil está apresentada no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Lista de concessionários de gás natural no Brasil em 2023.

Concessionário	Gás natural (mil metros cúbicos)	Concessionário	Gás natural (mil metros cúbicos)	Concessionário	Gás natural (mil metros cúbicos)
3R Bahia	151034,1	Gás Bridge	11073,8	Petrom	907,7
3R Fazenda Belém	341,6	Geoflux	1688,6	Petronas	386838,2
3R Macau	52869,3	Geopar - Geosol	175,1	Petrorecôncavo	34707,5
3R Pescada	14135,7	Geopark Brasil	62738,6	Petrosynergy	2680,0
3R Petroleum Off	207237,5	Guto & Cacal	7,1	Petro-Victory	135,5
3R Potiguar	9590,9	Imetame	33607,2	Phoenix Óleo & Gás	259,5
3R Rio Ventura	108815,9	IPI	619,8	Potiguar E&P S/A	262104,2
3R Rnce	292,6	Karoon Brasil	73551,6	Prio	2276,8
Alvopetro	84664,8	Mandacaru Energia	88,7	Prio Bravo	48946,6
Barra Bonita	9435,9	Newo	1688,6	Qatarenergy	282141,7
BGM	47,2	Níon Energia	2928,9	Recôncavo E&P	258,4
Brasil Refinarias	189,8	Nord	1,2	Recôncavo Energia	24604,2
Brasoil Manati	51664,9	Nova Petróleo	583,4	Repsol Sinopec	921350,9
BW Maromba	16182,0	Nova Técnica	8964,6	Seacrest Norte CAP	13133,3
Campo Petróleo	27,2	NFT	3377,1	Seacrest SPE Cricaré	24545,9
Capixaba Energia	3357,5	Oil Group	18,3	SHB	8849,3
Carmo	17166,3	ONGC Campos	27824,6	Shell Brasil	6361778,5
CNODC Brasil	830687,0	Origem	20104,4	Sinochem Petróleo	31466,4
CNOOC Petroleum	1186071,5	Origem Alagoas	434825,9	Slim Drilling	116,7
Enauta Energia	301745,3	Perenco Brasil	18096,6	Sonangol Guanambi	70,0
Energizzi Energias	349,3	Petro Rio Jaguar	293447,5	SPE Miranga	309742,5
Energy Paraná	6103,8	Petro Rio O&G	3434,4	SPE Tiêta	22678,7
Eneva	1092305,0	Petroborn	13083,0	Tarmar	2,6

Concessionário	Gás natural (mil metros cúbicos)	Concessionário	Gás natural (mil metros cúbicos)	Concessionário	Gás natural (mil metros cúbicos)
EPG Brasil	26,5	Petrobras	36264895,2	TotalEnergies EP	2115978,9
Equinor Brasil	47199,6	Petrogal Brasil	1663430,5	Trident Energy	146698,9
Equinor Energy	288975,4	Petroil	18,3	Vipetro	11,2

Fonte: Elaboração própria com dados de ANP (2024b).

Ao todo, 11 estados produziram gás natural em 2023. Dentre eles, os que mais produziram foram o Rio de Janeiro, Amazonas e São Paulo. A Figura 2.6 apresenta os dados de produção de gás natural em 2023.

Quadro 2.6 - Maiores estados produtores de gás natural do Brasil, em milhões de metros cúbicos, em 2023.

Unidade Federativa	Produção de gás (milhões de metros cúbicos)
Rio de Janeiro	39.554,00
Amazonas	5213,7
São Paulo	5133,8
Espírito Santo	1526,2
Bahia	1556
Maranhão	844,5
Alagoas	436,6
Rio Grande do Norte	383,5
Sergipe	19,1
Paraná	9,4
Ceará	0,3

Fonte: Elaboração própria com dados de ANP (2024b).

Para os próximos anos, o Brasil acompanha a tendência mundial. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em conjunto com o Ministério de Minas e Energia – MME, sinaliza uma produção de gás natural de 140 milhões de m³/dia em 2030, quase o dobro do valor para 2021, que foi de 73 milhões de m³/dia. Esse acréscimo tem sido possibilitado pelo aumento da produção nacional de gás associado, que deverá corresponder a 62% da oferta nacional em 2030. As reservas provadas também indicam que o país ainda tem muito para avançar neste setor (GUTIERREZ, 2022).

2.1.4 Aplicações

O gás natural pode ser usado nos setores automotivo, residencial/comercial e industrial (BARCELOS, 2023).

2.1.4.1 Setor automotivo

No Brasil, a perspectiva de uso de GNV se iniciou na década de 1980. Durante aproximadamente 10 anos, o seu uso em veículos pesados de cargas e de passageiros foi estudado. Entretanto, alguns fatores tornaram complexa a decisão da substituição do óleo diesel para o GNV, principalmente a disponibilidade e o preço. Àquela época, a disponibilidade de GNV era incipiente, devido ao gás natural ser produzido associado ao petróleo e ser considerado apenas um subproduto. O preço do GNV era similar ao do óleo diesel, tornando inviável a substituição na frota de pesados. Além disso, havia poucos postos de serviços seguros que ofereciam abastecimento desse combustível. Nos anos seguintes, na década de 1990, foi inaugurado o primeiro posto de serviço com venda de GNV e foi feita a liberação de seu uso para frotas de empresas e táxis. Adicionalmente, taxistas recebiam isenção de impostos quando optavam pelo GNV em relação aos combustíveis mais tradicionais. Em São Paulo, principalmente, essa medida foi satisfatória, uma vez que o número de táxis abastecidos por GNV aumentou. A partir do final da década de 1990, foi estabelecido que o GNV poderia ser utilizado para carros particulares. Essa medida propiciou o aumento do número de veículos abastecidos por gás natural e de postos de combustíveis com GNV e a demanda cresceu de forma considerável (GASNET, 2025).

Atualmente, há automóveis já fabricados para a utilização deste combustível; entretanto, na maioria deles, é necessário que se façam adaptações para se adquirir a possibilidade de serem abastecidos com gasolina/etanol e GNV. Essas adaptações são feitas adicionando ao automóvel uma série de equipamentos, como instalação de cilindros de gás (BENTES, PEREIRA, 2024).

Na esfera ambiental, o GNV é um combustível comprovadamente mais limpo. A emissão de CO₂ é aproximadamente 26% menor comparada à emissão causada pela gasolina, 17% menor comparada ao gás liquefeito de petróleo (GLP) e 27% se a comparação for com o diesel. Ademais, há redução da emissão de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos pesados. A emissão de particulados e compostos cancerígenos é praticamente nula (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

2.1.4.2 Setores residencial e comercial

Em residências, o gás natural é utilizado nos processos de cocção e calefação. Com isso, é fornecida água quente nas torneiras da cozinha, no chuveiro, secadoras, tanques e lavadoras, piscinas e saunas. É possível também substituir equipamentos elétricos para a climatização de cômodos. Para comércios, como restaurantes, *shoppings*, casas de festas e lavanderias, seu uso é destinado para aquecedores, fornos, ares-condicionados substituindo outros tipos de combustíveis como o diesel (TEIXEIRA, 2015).

O GN residencial e comercial ainda é principiante. No Brasil, apenas 2% das residências o utilizam. Em relação aos comércios, a porcentagem é ainda menor, em torno de 1%. A estrutura de gasodutos para a sua incorporação e a frequente vistoria desses sistemas são duas das razões para sua pequena utilização no Brasil (Balânco Energético Nacional, 2024).

2.1.4.3 Setor industrial

No setor industrial, o GN tem o principal objetivo de gerar calor para processos de aquecimento, substituindo a eletricidade. O custo de energia elétrica é bastante elevado em comparação ao gás e, portanto, pode aliviar a demanda de energia elétrica às indústrias. Somente em 2024, cerca de 30,9% foram demandadas industrialmente, conforme dados do Balanço Energético Nacional. Outro fator que contribui para seu uso é a baixa emissão de CO₂ em relação a outros combustíveis (TEIXEIRA, 2015).

Somado a isso, o gás natural é matéria prima para diversos tipos de indústrias. Na petroquímica, o GN é utilizado na fabricação de tintas, plásticos, borrachas e fibras sintéticas, enquanto na indústria de fertilizantes é destinado à fabricação de amônia e ureia (REIS *et al.*, 2018).

2.1.4.4 Setor elétrico

Em termelétricas, a geração de energia é feita quando combinados o ciclo de vapor (ciclo de *Rankine*) e o ciclo de gás natural (ciclo de *Brayton*). O GN é utilizado na primeira etapa da geração de eletricidade. As turbinas dessas usinas giram devido à alta pressão e à alta temperatura proporcionadas pela queima de gás natural em câmaras de combustão. O giro das turbinas é responsável por mobilizar os geradores elétricos (ROSA, 2024).

Comparativamente ao carvão e ao óleo, em termelétricas, o GN apresenta aumento na eficiência energética e diminuição na emissão de gases, geração de resíduos sólidos e consumo

de combustível (ORTEGOSA, 2006). O Quadro 2.7 apresenta os ganhos ambientais e de eficiência no uso do gás natural nas usinas termelétricas de capacidade de 450 MW.

Quadro 2.7 - Comparaçao entre combustíveis em termelétricas com capacidade de 450 MW.

Combustível	Eficiência Energética (%)	Consumo de Combustível (t/dia)	Resíduos Sólidos (t/dia)	Gases Emitidos (t/dia)		
				SO ₂	NO _x	CO ₂
Carvão	38	3600	450	75	10 a 35	9000
Óleo	39	2250	1	170	7 a 15	7500
Gás Natural	40	2100	0	0	3 a 15	6000

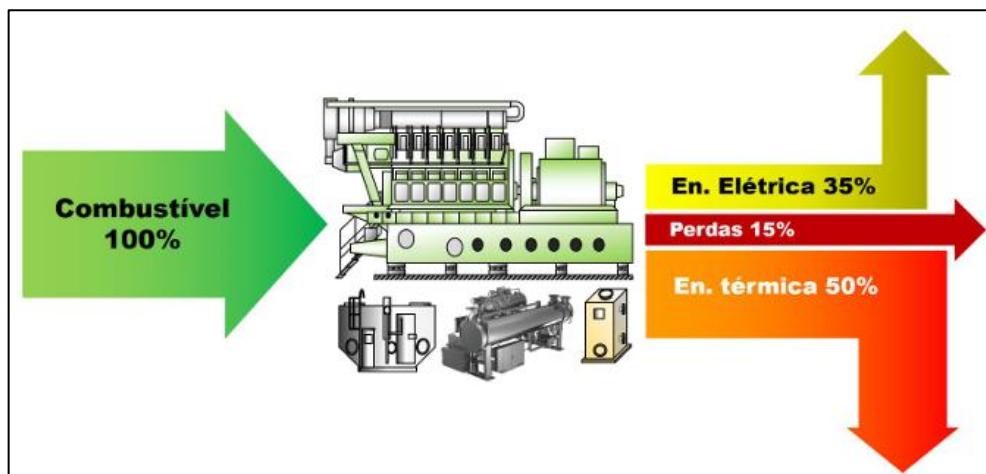
Fonte: ORTEGOSA (2006).

2.1.4.5 Cogeração

A cogeração é caracterizada pela produção de mais de um tipo de energia (elétrica, mecânica e/ou térmica) a partir de um mesmo combustível. Essa fonte energética pode ser aproveitada em até 85% para gerar vapor, água quente, água gelada, força motriz e eletricidade. Sendo assim, os benefícios da cogeração é o alto aproveitamento energético, obtendo-se mais eficiência no processo, a um menor custo. Outro fator benéfico é a possibilidade de utilização em qualquer empreendimento, no qual sejam necessárias energias elétrica e térmica, como hotéis, shoppings, indústrias de siderurgia e cerâmica (ANDREOS, 2013).

A Figura 2.11 apresenta um esquema sobre a cogeração de energia a partir do gás natural, indicando o quanto é convertido a energia elétrica, térmica e o quanto corresponde a perdas.

Figura 2.11 - Esquema da cogeração de energia a partir do gás natural.



Fonte: SOUZA (2019).

2.2 CADEIA PRODUTIVA

A cadeia produtiva do gás natural pode ser dividida em três etapas: *upstream*, *midstream* e *downstream*.

A etapa *upstream* é caracterizada pelas atividades de análise e exploração das reservas de gás natural. Primariamente, são feitas análises geológicas em potenciais pontos de exploração. A avaliação dos dados geológicos produzidos de volume de gás natural dá uma previsão estatística de sua ocorrência em uma determinada região. As formações geológicas podem ser categorizadas como reservas provadas, prováveis, possíveis e totais, dependendo do grau de incerteza. As reservas provadas são aquelas com alto grau probabilístico de se ter ocorrência de gás natural. Nessas regiões, a probabilidade de se extrair volume igual ou superior de gás natural àquele estimado nas análises prévias é de, no mínimo, 90%. As reservas prováveis são aquelas com 50% de probabilidade de extrair volume igual ou superior ao volume estimado pelas pesquisas. Já as possíveis possuem alto grau de incerteza. Espera-se probabilidade mínima de 10% de se encontrar volume comercial de gás natural, segundo estimativas anteriores. As reservas totais são a soma de todas as outras citadas anteriormente (Centro Brasileiro de Infraestrutura, 2025, VELHOS, 2018, DUARTE, 2015).

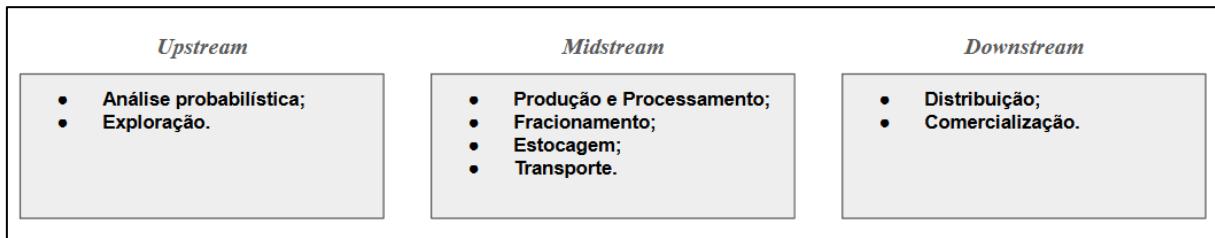
A exploração das reservas também faz parte da etapa de *upstream*. Esta atividade pode ser desempenhada tanto *onshore* quanto *offshore*, em poços de gás associado ou não associado (VELHOS, 2018). A exploração representa o conjunto de atividades que englobam o planejamento, projeto, construção, manutenção e operação de plantas de gás natural (GEROSA, MATAI, 2006).

A etapa *midstream* é caracterizada pelas atividades de produção, processamento, fracionamento, estocagem e transporte. Nessa etapa, o gás extraído é separado e passa pelos processos de uma planta de processamento. O gás natural é enquadrado em requisitos de segurança, de meio ambiente e de comercialização, sendo ainda fracionado para que se recuperem alguns componentes, como o gás liquefeito de petróleo e hidrocarbonetos com mais de cinco carbonos (C5+) (VIANA, 2019).

O gás natural pode ser transportado sob as formas de GLP (gás liquefeito de petróleo) em sistemas criogênicos, GNC (gás natural comprimido) em cilindros de alta pressão, e como gás natural em gasodutos, que podem ser divididos em três tipos: escoamento, que enviam o gás até as unidades de processamento; transporte, que transportam o gás até os distribuidores; e distribuição, que transferem o gás até os consumidores finais. No Brasil, atualmente, há 58,4 km de gasodutos, sendo 42,7 km apenas de distribuição (ANP, 2024b).

A última etapa da cadeia produtiva é a *downstream*, que corresponde às atividades de distribuição e comercialização. O gás natural é entregue aos concessionários e comercializado para residências, comércios, indústrias e pontos de abastecimento (GUTIERREZ, 2022). De forma resumida, a cadeia produtiva é representada conforme verificado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Esquema das atividades de cada parte da cadeia produtiva do gás natural.



Fonte: Elaboração própria.

2.3 SEPARAÇÃO DOS COMPONENETS DO PETRÓLEO BRUTO

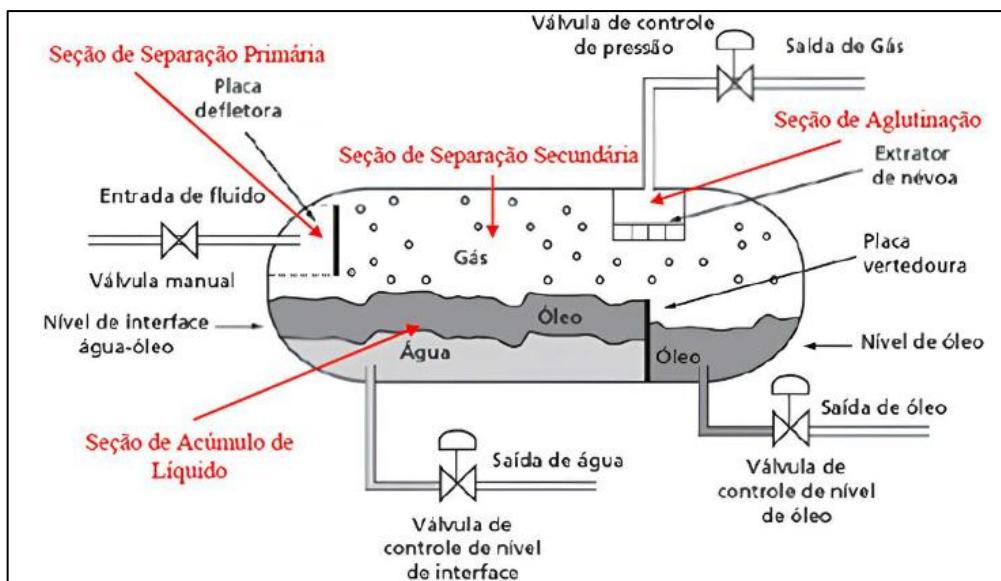
Ao se tratar de gás natural associado, a emulsão retirada dos poços é enviada para separadores. Após essa etapa, o gás bruto é enviado para a Unidade de Tratamento de Gás (UTG), o qual passa pelas etapas de processo para a retirada de água, gases ácidos e gases não condensados (MARTINS, 2017).

2.3.1 Separação do gás associado ao óleo

A emulsão óleo-GN é extraída dos poços, enviada ao *manifold* de coleta e, em seguida, para os separadores gás/líquido. Estes equipamentos, que funcionam pela ação da gravidade, apresentam algumas seções munidas de acessórios, que auxiliam essa operação unitária, aumentando sua eficiência (MARTINS, 2017).

A primeira seção é a de coleta da emulsão que chega do *manifold*. O fluido encontra deflectores posicionados na entrada do vaso, que possuem o objetivo de diminuir a sua velocidade com o choque e separar o gás do líquido. O líquido, então, se encaminha para o fundo do vaso, pela ação da gravidade, resultando na segunda seção do equipamento (seção de acúmulo). As gotículas de líquido que não foram separadas pela gravidade são carregadas pelo gás até a seção de aglutinação, onde meios poros são responsáveis por coalescer e decantar as gotículas, desidratando-o. Já a seção de separação secundária, influenciada pela turbulência do gás, refere-se à circulação das gotículas de líquido carreadas pelo gás e encaminhadas ao topo do separador (NASCIMENTO, 2017). A Figura 2.13 ilustra um vaso separador gás-líquido, cujas correntes superior e inferior representam a saída de gás e líquido, respectivamente.

Figura 2.13 - Representação típica de um vaso separador gás-líquido.



Fonte: ALVES, KOMESU (2025).

2.3.2 Tratamento de gás

Após a saída dos separadores, o gás é carreado para a Unidade de Tratamento de Gás. O gás bruto apresenta concentração alta de hidrocarbonetos, vapor de água e contaminantes. Sendo assim, é imprescindível que o tratamento seja feito para que o gás seja encaminhado às Unidades de Processamento de Gás (UPGNs), que farão a separação do gás em produtos específicos (QUARANTA, 2021).

É possível categorizar o gás natural como rico e pobre pela composição volumétrica dos hidrocarbonetos que o compõem. O GN é considerado pobre quando a soma dos componentes com massa molecular maior que o propano é menor que 7%. Caso contrário, o gás é chamado de rico (QUARANTA, 2021).

O Quadro 2.8 apresenta a composição de metano, etano, propano, C4+ (hidrocarbonetos com quatro ou mais carbonos), CO₂, N₂ e H₂S do gás natural bruto, conforme localidade de produção.

Quadro 2.8 – Composição do gás natural bruto conforme localidade de produção no Brasil.

Origem	Composição em % v/v						H ₂ S (mg/m ³)
	Metano	Etano	Propano	C4+	CO ₂	N ₂	
Rio de Janeiro	89,4	6,7	2,3	0,5	0,3	0,8	6,7

Origem	Composição em % v/v						H_2S (mg/m ³)
	Metano	Etano	Propano	C4+	CO_2	N_2	
Bahia	88,6	9,2	0,4	-	0,7	1,2	7,6
Alagoas	76,9	10,1	5,8	1,7	1,2	2,0	7,5
Rio Grande do Norte	83,5	11,0	0,4	-	2,0	3,2	1,5
Espírito Santo	84,8	8,9	3,0	0,9	0,3	1,6	7,5
Ceará	76,1	8,0	7,0	4,3	1,1	1,5	1,5

Fonte: Adaptado de SOUZA (2017), VAZ, MARTINS, MAIA (2008).

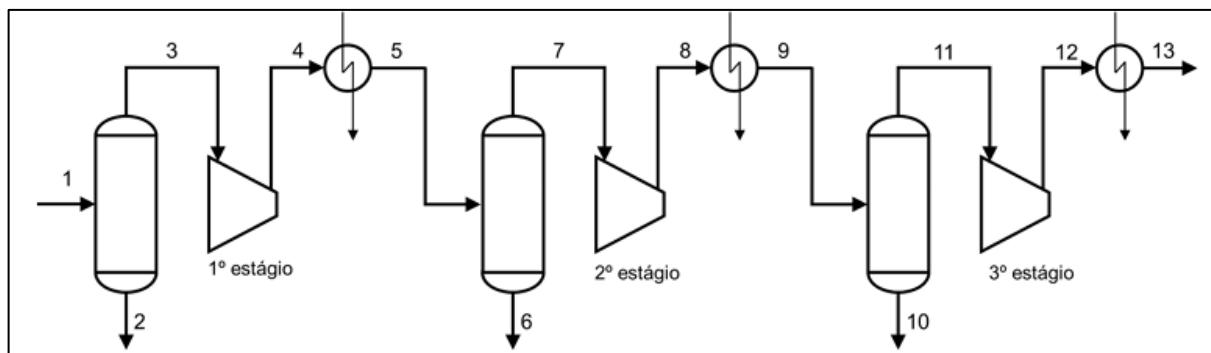
Nota-se que no Rio de Janeiro, o principal produtor de GN do Brasil, a porcentagem em volume de metano é de quase 90% e o gás bruto apresenta, pelo menos, 6,7 mg/m³ de H_2S e 0,3% volumétrico de CO_2 , considerados dois principais contaminantes.

2.3.2.1 Unidade de Compressão Principal

O primeiro processo após a saída do gás bruto dos separadores trifásicos é a Unidade de Compressão Principal. O objetivo dessa unidade é fornecer energia e pressão suficientes ao gás para que seja carregado para as unidades posteriores e/ou para que seja utilizado como *gas lift*. A configuração típica dessa unidade está apresentada na Figura 2.14.

Cada subsistema dessa unidade apresenta um compressor, um resfriador e um vaso depurador. Ao passo que o compressor eleva a pressão do gás, a temperatura cresce demasiadamente e parte do gás se condensa. Com isso, é necessário um resfriador para diminuir a temperatura para o nível operacional desejado e o vaso depurador para fazer a separação gás-líquido. A fração líquida retirada é enviada para o sistema de drenagem fechada, enquanto o gás passa para o próximo estágio de compressão (COSTA, 2021).

Figura 2.14 - Sistema de compressão principal de gás natural em três estágios.



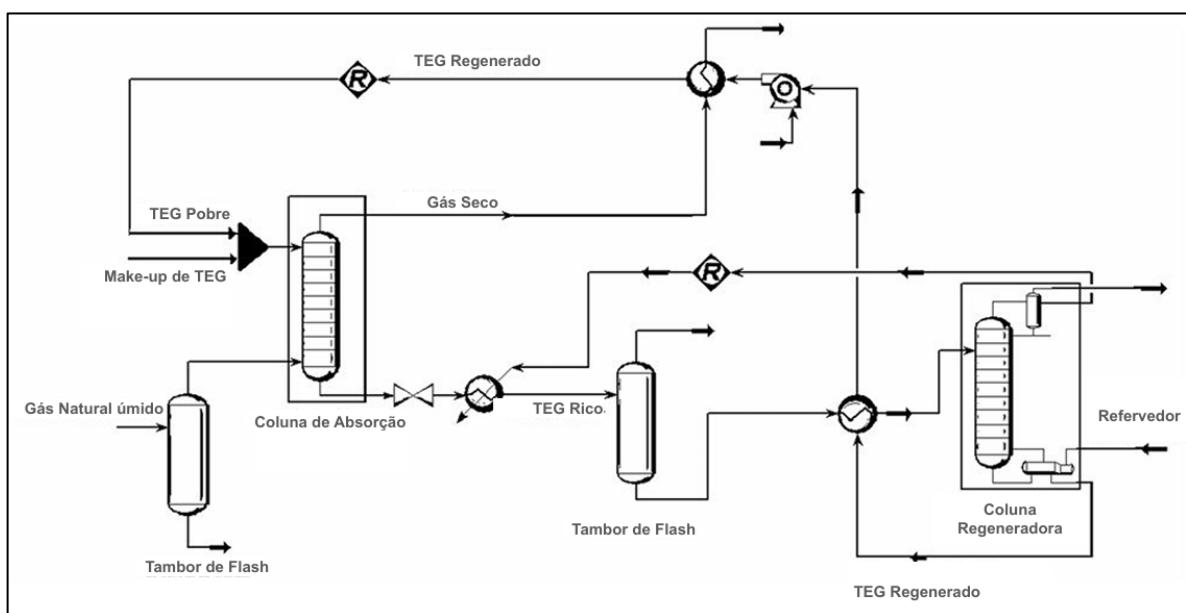
Fonte: COSTA (2021).

2.3.2.2 Unidade de Desidratação de Gás

Após o adoçamento de gás, o GN úmido é desidratado na Unidade de Desidratação de Gás, antes de ser enviado para as Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGNs). O destaque dessa unidade se deve aos problemas que o gás úmido pode causar em equipamentos, tubulações e instrumentos, sendo o principal a formação de hidratos. Os hidratos de gás são compostos cristalinos formados por moléculas de água que possuem cavidades capazes de enclausurar gases de pequeno peso molecular (hospedeiros), sendo formados em condições de alta pressão e baixa temperatura e apresentando aspecto esbranquiçado como o gelo. A formação desses hidratos causa a obstrução de tubulações, considerado um desafio para as instalações da indústria de óleo e gás (BARCANTE, 2016).

Em uma unidade de desidratação *offshore* tradicional, o gás úmido (gás saturado com vapor de água) entra em uma torre absorvedora e, em contracorrente, escoa uma solução quase pura de glicol pobre, sendo o mais utilizado o TEG (trietilenoglicol). O TEG pobre absorve o vapor de água do gás, tornando-se TEG rico (saturado), enquanto o gás saturado, em contato com a solução de glicol, perde as moléculas de água, tornando-se desidratado (MOGHADDAM, 2023). Ao final dessa etapa, o gás se encontra dentro das especificações necessárias para ser transportado por meio dos gasodutos. A Figura 2.15 ilustra a uma unidade de desidratação de gás natural típica.

Figura 2.15 - Diagrama de processo de uma unidade de desidratação de gás natural utilizando trietilenoglicol glicol (TEG).



Fonte: MOGHADDAM (2023).

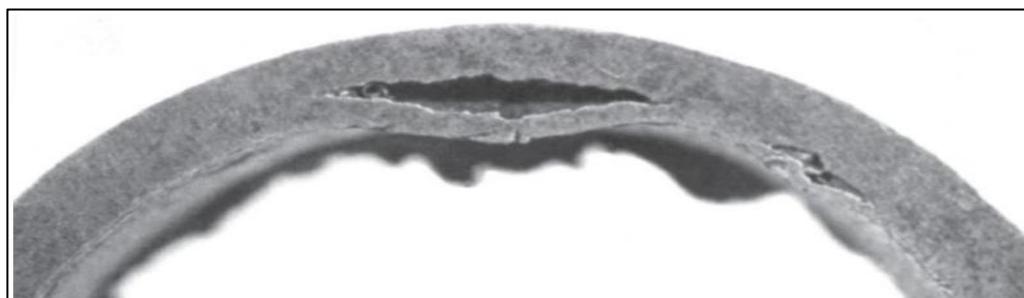
2.4 ADOÇAMENTO DE GÁS NATURAL

O processo de adoçamento (ou dessulfurização) de gás é caracterizado pela remoção ou diminuição da concentração de impurezas. A técnica mais utilizada é a de absorção de gás por aminas (SANTOS *et al.*, 2021).

2.4.1 Gases ácidos

Os gases ácidos são compostos corrosivos, capazes de comprometer equipamentos e tubulações das instalações químicas. São causadores de problemas de saúde e liberados erroneamente para o meio ambiente (WEIKERT, 2021). A Figura 2.16 retrata a ocorrência de um desgaste na tubulação de gás natural.

Figura 2.16 - Secção de tubulação com empolamento pelo H₂ ocasionado por gás sulfídrico e umidade.



Fonte: GENTIL (2011).

O H₂S, também conhecido como gás sulfídrico, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio sulfurado ou ácido hidro-sulfúrico, é um gás incolor, mais denso que o ar, com odor desagradável de ovos podres (embora perda esse odor em altas concentrações). O H₂S pode ser usado na produção de diversos sulfetos inorgânicos, como ácido sulfúrico, compostos orgânicos sulfurosos e enxofre elementar, sendo um dos principais contaminantes dos poços de gás associado e não associado (BHOMICK, RAO, 2014).

O gás sulfídrico é caracterizado como gás tóxico e inflamável. Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (SP), esse composto apresenta os pictogramas ilustrados na Figura 2.17. Com isso, trata-se de um gás extremamente inflamável, que pode explodir sob ação de calor, sendo fatal se inalado, gravemente irritante aos olhos, danoso a órgãos e bastante tóxico em ambientes aquáticos.

Figura 2.17 - Pictogramas do gás sulfídrico.



Fonte: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2025a).

A maioria de seus efeitos ocorre devido à inalação, embora também possa ocorrer via olhos. No organismo humano, o H₂S afeta, principalmente, órgãos e tecidos que possuem membranas mucosas (nariz e olhos) e que demandam grande concentração de oxigênio (pulmões). Além disso, o gás pode afetar o sistema neurológico, rins e fígado (BHOMICK, RAO, 2014).

A Figura 2.18 lista alguns efeitos causados pelo gás sulfídrico sobre o ser humano. Verifica-se que apenas o odor de ovo podre não é um indicativo da presença de H₂S no ambiente, uma vez que o contato de, pelo menos, 2 minutos a 150 ppm causa a perda da sensibilidade olfativa.

Figura 2.18 - Efeitos da exposição de H₂S no corpo humano.

Concentração H ₂ S (ppm)	Tempo de Exposição	Efeito no ser humano
0,05 - 5	1 min	Detecção do odor característico
10 – 30	6 - 8 h	Irritação dos olhos
50 - 100	30 min - 1 h	Conjuntivite, dificuldades de respiração
150 - 200	2 - 15 min	Perda de olfato
250 - 350	2 - 15 min	Irritação dos olhos
350 - 450	2 - 15 min	Inconsciência, convulsão
500 - 600	2 - 15 min	Distúrbios respiratórios e circulatórios
700 - 1500	0 - 2 min	Colapso, morte

Fonte: MATIELLO (2017).

Existem outros compostos orgânicos de enxofre que podem fazer parte do gás natural, em menor quantidade, quando comparado ao gás sulfídrico, incluindo as mercaptanas, sulfetos (como o sulfeto de carbonila e o dissulfeto de carbono - COS e CS₂, respectivamente), tiol e tiofenos (AGUIAR, 2016).

O CO₂ também forma compostos ácidos quando em contato com a água e é comumente encontrado no gás natural. Trata-se de um gás não inflamável, incolor e inodoro que, quando inalado, causa tontura e dificuldade respiratória (Companhia Ambiental do Estado de São

Paulo, 2025b). O gás carbônico é muito comentado devido às pautas sobre mudanças climáticas. É produzido em grandes quantidades por causa de ações antrópicas, sendo um dos gases do efeito estufa (GEE), o que, por consequência, contribuiu para o aumento da temperatura média do planeta (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

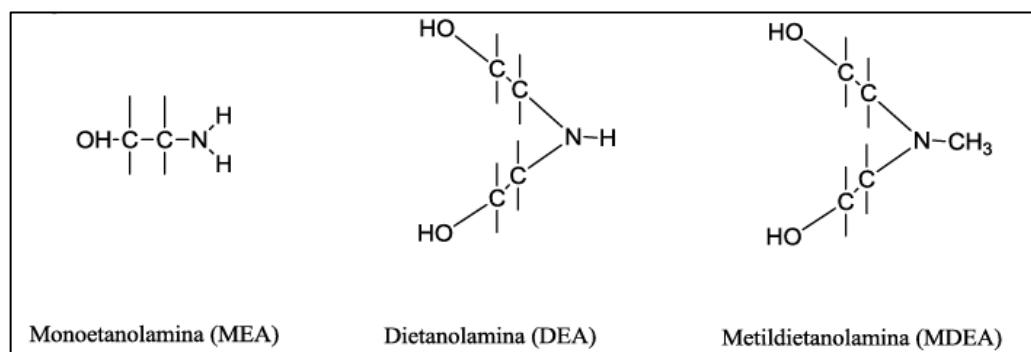
2.4.2 Processo tradicional de dessulfurização de gás natural

2.4.2.1 Aminas

As aminas (ou alanolaminas) são geradas a partir da amônia e são compostos orgânicos que apresentam um grupo hidroxi (-OH) e um grupo amino (-NH₂, -NHR, -NR₂). São caracterizadas como primária, secundária e terciária conforme o grau de substituição do nitrogênio, assim como ocorre com álcoois e haletos de alquila. Aminas primárias possuem apenas um hidrogênio substituído, enquanto as secundárias possuem dois e, as terciárias, três (BORGES, 2023).

As aminas mais comuns empregadas comercialmente nos processos de adoçamento de gás natural são a monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) e metildietanolamina (MDEA). Todas são capazes de absorver os contaminantes do gás (gases ácidos), purificando-o. As estruturas químicas desses compostos estão representadas na Figura 2.19. Nota-se que MEA é uma amina monossubstituída, chamada de amina primária, enquanto DEA e MDEA são aminas secundária e terciária, respectivamente (QUEIROZ, 2016).

Figura 2.19 - Estruturas químicas das alanolaminas utilizadas nos processos de adoçamento de gás natural.



Fonte: QUEIROZ (2016).

Para o processo de adoçamento, é possível fazer uma mistura destas aminas com o intuito de obter o resultado esperado. Comparativamente, as aminas possuem características únicas que permeiam as escolhas para seus usos, conforme observado no Quadro 2.9.

Quadro 2.9 - Comparativo entre as aminas monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) e metildietanolamina (MDEA) utilizadas no adoçamento de gás natural.

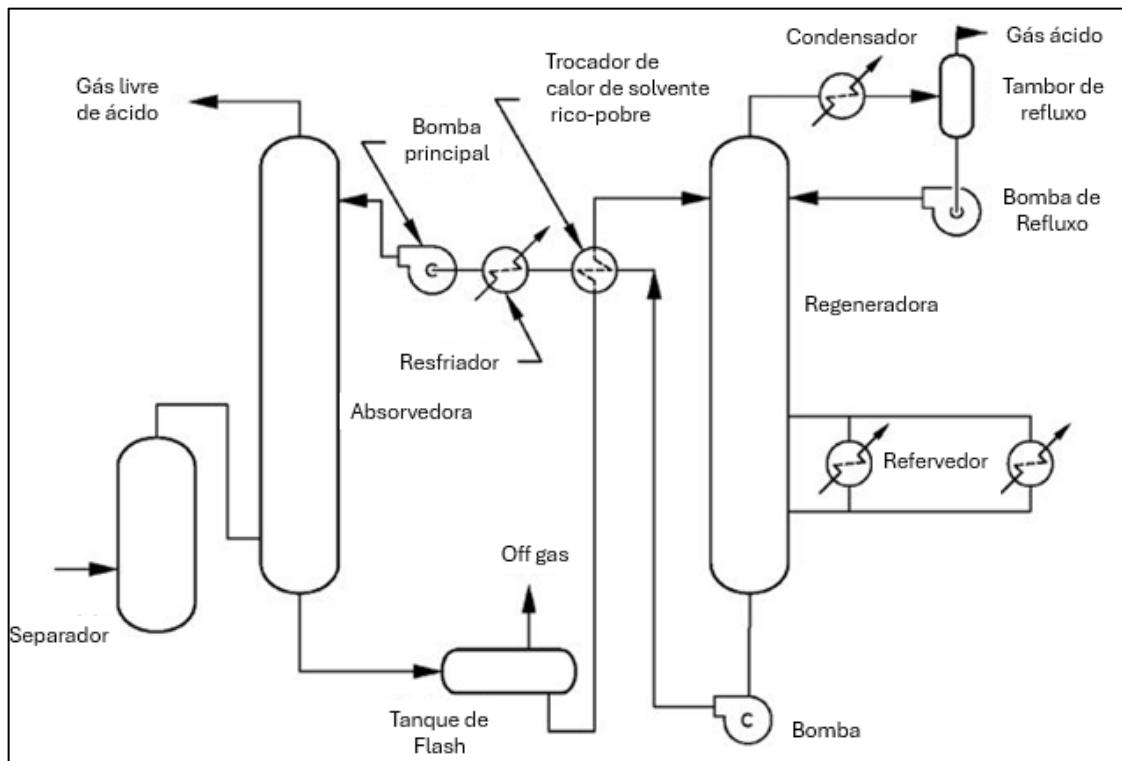
Solvente	Vantagens	Desvantagens
MEA	-Vantajoso para baixas concentrações de CO ₂ ; -Baixo custo de produção.	-Corrosivo; -Baixa absorção de CO ₂ ; -Alta pressão de vapor
DEA	-Baixa pressão de vapor; -Pouco reativo com COS e CS ₂ ; -Pouco corrosivo.	-Não adequado para processos com altas concentrações de CO ₂ ; -Formação de produtos corrosivos.
MDEA	-Alta captura de H ₂ S em presença de CO ₂ ; -Apropriado para altas concentrações de gases ácidos; -Pouco corrosivo; -Alta resistência; -Baixa pressão de vapor; -Pouco reativo com COS e CS ₂ .	-Baixos valores de calor de reação; -Reação lenta.

Fonte: Adaptado de WEIKERT (2021).

2.4.2.2 Descrição do processo

O fluxograma típico de uma unidade de adoçamento de gás sob o método de absorção com amina está representado na Figura 2.20.

Figura 2.20 - Fluxograma do processo de adoçamento de gás natural com amina.



Fonte: Adaptado de STEWART, ARNOLD (2011).

Stewart e Arnold (2011) detalham o funcionamento da separação de gases ácidos do GN.

O gás é conduzido para a Coluna de Absorção (ou absorvedora), sendo introduzido no fundo, em contracorrente com a solução de aminas, introduzida pelo topo. Os contaminantes do gás natural ainda azedo são absorvidos pela solução de aminas e o gás retirado no topo da coluna de absorção.

Para a maior efetividade da coluna, a temperatura e a pressão precisam ser rigorosamente controladas. A pressão da coluna é alta para melhorar a eficiência, enquanto a faixa de temperatura ideal fica entre 30-55 °C. O aumento da temperatura da coluna amplia a eficiência da ligação amina-contaminante, uma vez que melhora a cinética de absorção. Entretanto, temperaturas muito altas produzem o efeito contrário, em que a pressão de vapor dos contaminantes (CO_2 e H_2S) aumenta, resultando em sua retirada no topo (caracterizando um gás fora da especificação). Além disso, a temperatura da solução de aminas deve ser, ao menos, 5 °C maior que a do gás.

O gás natural doce é, então, enviado para a Unidade de Desidratação do Gás, ao passo que a solução de amina com as impurezas (chamada de amina rica) é enviada a um vaso separador. Este equipamento visa a separação da amina rica com gases que escaparam e foram dissolvidos. Estes últimos saem na corrente de topo, enquanto a amina segue para o equipamento seguinte. O Tanque de *Flash* opera a alta pressão e o tempo de retenção do líquido é de 10 a 20 minutos. Após essa etapa, a amina é aquecida em um trocador de calor de solvente. O objetivo deste trocador é diminuir a carga de trabalho da Coluna Regeneradora.

A Coluna Regeneradora (ou Coluna de Esgotamento) funciona de forma oposta à de Absorção. Neste equipamento, as impurezas tratadas são desprendidas da solução de amina, tornando-a uma amina pobre. O processo ocorre em pressão baixa e alta temperatura. À medida que a amina rica entra na coluna pelo topo, vapor de água aquecido pelo revereedor entra pelo fundo, em contracorrente. O calor do vapor é o responsável por quebrar a interação amina-impureza. Os gases separados são retirados no topo da coluna junto com o vapor de água e, a amina pobre, no fundo.

O sistema formado por condensador, tambor e bomba de refluxo tem o objetivo de manter baixa a concentração de amina no topo da Coluna de Esgotamento. Sendo assim, o vapor de água é condensado e a mistura bifásica (gases ácidos + água) é separada no tambor de refluxo. Os gases ácidos são retirados no topo do separador e a água é bombeada para o topo da regeneradora. A amina pobre é bombeada para um trocador de calor, chamado trocador de

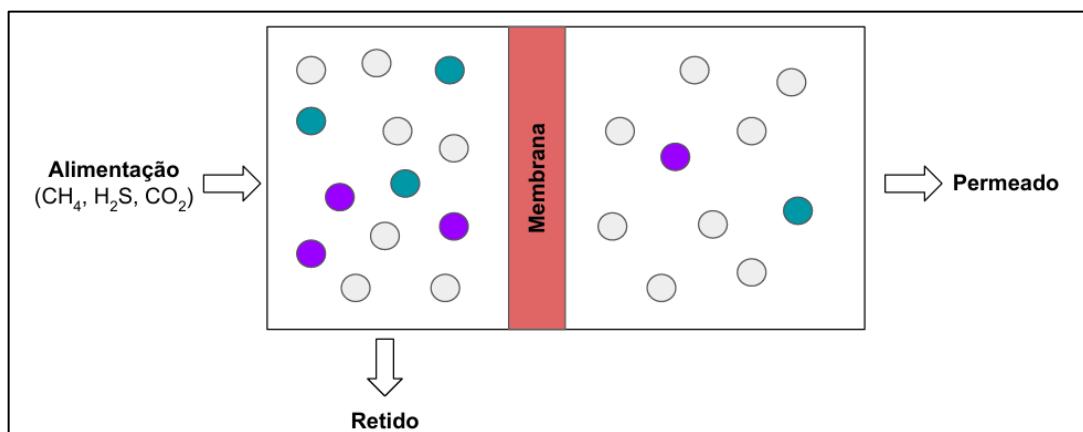
calor de solvente, para ser resfriada. O resfriador a montante garante que a amina pobre seja bombeada para a Coluna de Absorção, a uma temperatura ótima para o processo.

2.4.3 Outros processos de adoçamento de gás natural

A separação por membranas é baseada na Lei de *Fick*. A força motriz responsável pela transferência de massa é função da diferença de pressão parcial. Nesse caso, as membranas funcionam como um material semipermeável que permitem a passagem de determinados compostos da mistura, enquanto impedem a passagem de outros. Dentre as vantagens do processo estão a compactação da tecnologia, alta eficiência e não geração de resíduos (TACHY, 2016). As desvantagens incluem o tempo de vida e a reposição encarecida, além da possibilidade de se ter caminhos preferenciais, diminuindo a eficiência (TOSCANO, 2015).

De modo geral, as membranas têm sido vistas como uma tecnologia a ser observada mais cuidadosamente, uma vez que o processo tradicional de adoçamento de GN requer espaços maiores, além dos obstáculos operacionais que podem ocorrer, como a formação de espuma (WEIKERT, 2021). A Figura 2.21 ilustra o esquema de separação por membranas.

Figura 2.21 - Esquema da separação de gases ácidos do gás natural por membranas.



Fonte: Elaboração própria.

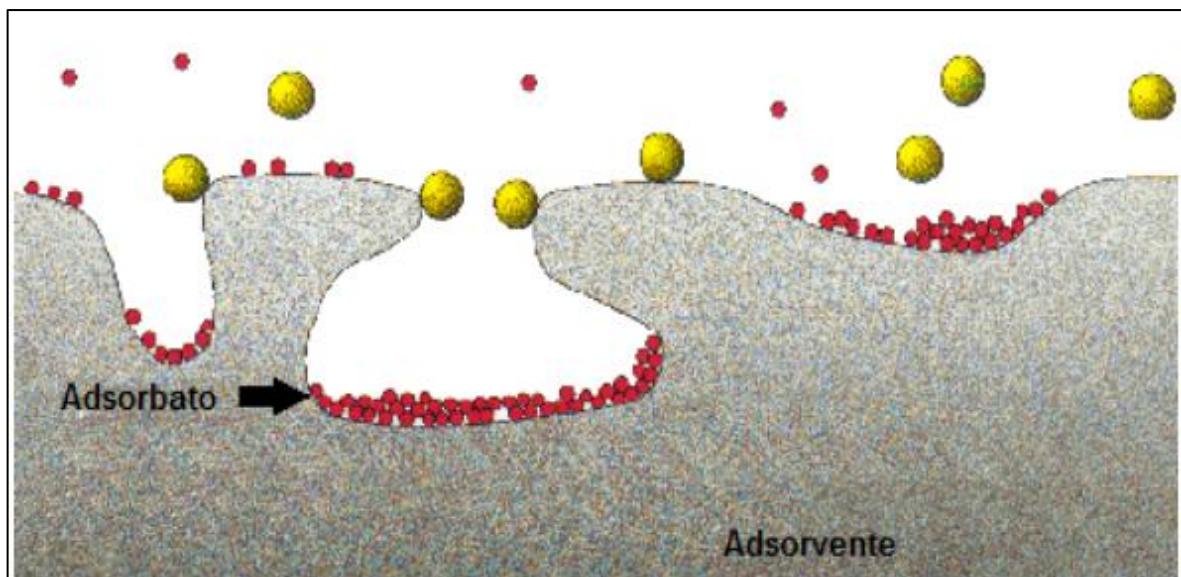
A adsorção é um processo baseado na aderência de determinados componentes de uma mistura em uma superfície sólida por quimissorção ou fisissorção. Na primeira, há uma reação irreversível entre o adsorvente (sólido) e o composto gasoso (adsorvato) enquanto, na segunda, ocorre uma interação por forças de *van der Waals*. Ambos os processos são exotérmicos, sendo o de quimissorção responsável pela liberação de aproximadamente 200-450 kJ/mol, cerca de

15 a 50 vezes superior à liberação de energia pela fisissorção (ARVELOS, 2017, PHILIPPI, 2017).

O processo de dessorção, retirada do adsorvato do adsorvente, pode ser feito com aquecimento progressivo do sólido a pressão ambiente até a temperatura ótima de dessorção (*Temperature Swing Adsorption - TSA*), ou pela diminuição da pressão após a adsorção, processo que pode ser chamado de *Pressure Swing Adsorption (PSA)* e *Vacuum Swing Adsorption (VSA)* (PHILIPPI, 2017).

A Figura 2.22 representa o esquema de separação de GN por absorção.

Figura 2.22 – Esquema de adsorção dos gases ácidos presentes no gás natural.



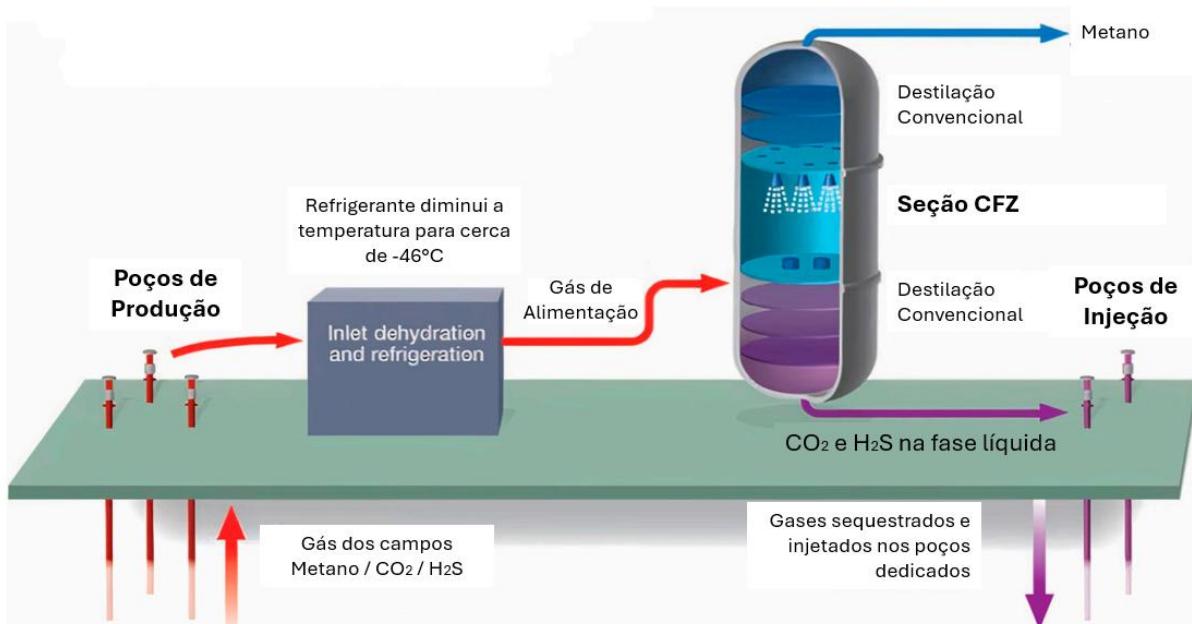
Fonte: ALVES (2018).

A criogenia é um processo que ocorre a baixas temperaturas e alta pressão. A separação dos gases ácidos da corrente de GN é feita utilizando a diferença entre o ponto de congelamento dos componentes mais abundantes, como o metano, e os poluentes (BORSCHIVER, SILVA, 2014). Há uma série de possibilidades para a separação criogênica. A tecnologia denominada *Controlled Freeze Zone™* (CFZ™) é um processo não-convencional, desenvolvido pela empresa *ExxonMobil Upstream Research Company* em 1985. O processo opera a pressão constante e é formado por uma coluna de destilação que apresenta três regiões. A primeira é uma seção superior de retificação convencional, onde a concentração CO₂ é reduzida por meio da destilação convencional. A segunda região é a CFZ™, onde o líquido da primeira seção é pulverizado. A temperatura é mais alta (entre -90 °C e -85 °C) e, como consequência, ocorre a vaporização de compostos mais leves como o metano, enquanto as gotículas tornam-se mais

rica em gases ácidos e se solidificam, alcançando temperaturas entre -62 °C e -45 °C. A terceira região chama-se seção inferior de remoção de convencional e, nela, o metano é removido da corrente líquida rica em gases ácidos por meio do processo tradicional de destilação (HASSAN *et al.*, 2022).

A Figura 2.23 representa o esquema de separação de GN por esta tecnologia.

Figura 2.23 – Fluxograma de separação de gás natural por destilação criogênica pelo processo *Controlled Freeze Zone™* (CFZ™).



Fonte: Adaptado de HASSAN *et al.* (2022).

2.5 RESOLUÇÃO N° 982, 2025

No dia 21 de maio de 2025 foi promulgada a revogação da resolução de número 982 da resolução de número 16 da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), em que são definidas as características de comercialização do GN no Brasil.

A Figura 2.24 apresenta a especificação esperada do GN produzido e revendido no Brasil. Além das características e dos limites tolerados para cada uma das cinco regiões do Brasil, a(s) norma(s) que determina(m) os requisitos exigíveis de cálculo das especificações são apresentados. Observam-se três importantes características que o GN deve apresentar: porcentagem molar de gás carbônico, porcentagem molar de enxofre total, e porcentagem molar de gás sulfídrico. Portanto, o processo de dessulfurização é fundamental para que o GN seja enquadrado nos requisitos definidos pela ANP (ANP, 2025).

Figura 2.24 - Especificação do Gás Natural segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO			
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO/EN	
Poder calorífico superior	kJ/m ³	34.000 a 38,400		35.000 a 43.000		15213	3588	6976
	kWh/m ³	9,47 a 10,67		9,72 a 11,94				
Índice de Wobbe	kJ/m ³	40.500 a 45.000		46.500 a 53.500		15213	-	6976
Número de Metano, mín.	-	Anotar		65,0		-	-	15403-1 EN 16726
Metano, mín.	% mol.	68,0		85,0		14903	1945	6974
Etano, mín.	% mol.			12,0		14903	1945	6974
Propano, mín.	% mol.	3,0		6,0		14903	1945	6974
Butanos e mais pesados, mín.	% mol.	1,5		3,0		14903	1945	6974
Oxigênio, máx.	% mol.			0,5		14903	1945	6974
Inertes (N ₂ + CO ₂)	% mol.	18,0	8,0	6,0	14903	1945	6974	
CO ₂ , máx.	% mol.			3,0		14903	1945	6974
Enxofre total, máx.	mg/m ³			70,0		15631	4468, 5504, 6228, 7165	6326-3, 6326-5, 19739
	mgS/m ³			Anotar				
Gás sulfídrico, máx.	mg/m ³	10,0	13,0	10,0	15631	4468, 5504, 6228, 7165	6326-3 19739	
Ponto de orvalho de água a 1 atm, máx.	° C	-39		-45		15765, 15912	1142 5454	
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos a 1 atm, máx.	° C	15		0		16338	-	
Mercúrio	µg/m ³			Anotar		-	6350	6978-1, 6978-2

Fonte: Adaptado de Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2025).

3 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

O estudo de prospecção tecnológica se caracteriza como uma ferramenta essencial, capaz de auxiliar em soluções para possíveis desafios futuros em diversos níveis da sociedade, desvendados após esse tipo de trabalho. É possível planejar ações e políticas que serão de suma importância para os desenvolvimentos econômico, social e ambiental no futuro, com grau de incerteza menor, auxiliando nas tomadas de decisões estratégicas. Não é factível prever o futuro, no entanto, com dados coletados de processos do passado, alinhados aos dados obtidos no presente momento, e com uma metodologia de pesquisa bem construída, delinear as visões do futuro podem ser executáveis (BORSCHIVER, JESUS, MOREIRA, 2015, PARANHOS, RIBEIRO, 2018).

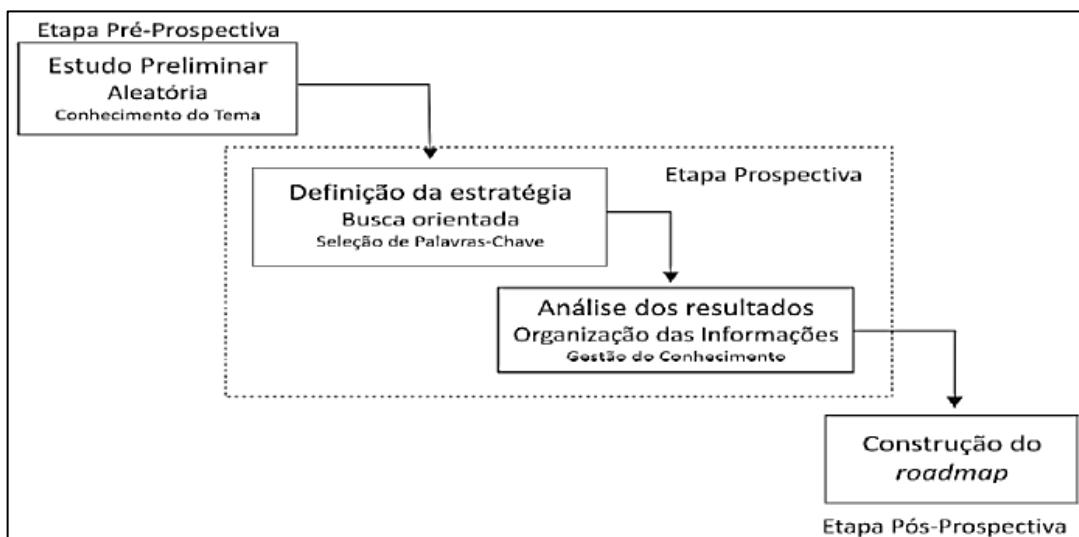
Governos, instituições públicas e privadas podem agir sob quatro tipos diferentes de óticas de acordo com mudanças tecnológicas que a sociedade poderá sofrer. Na atitude passiva, essas organizações sofrem as consequências das mudanças. Já na atitude reativa, agem após mudanças ocorrerem. Na atitude pré-ativa, se preparam antecipadamente para as mudanças e, na pró-ativa, a própria organização é a responsável por essas mudanças. A prospecção tecnológica, seguindo essa lógica, se insere nas atitudes pré e pró-ativas (GODET 2000, *apud* ROSA, 2022). Este processo é feito em quatro passos: coleta de dados, processamento de dados, interpretação e integração dos dados e a aplicação do conhecimento para tomada de decisões (BORSCHIVER, 2019).

Para este trabalho, a prospecção tecnológica auxiliará na análise do desenvolvimento de métodos e processos de dessulfurização de GN, uma vez que a demanda energética segue em alta, há demasiado número de reservas desse combustível ainda não exploradas e a necessidade de um produto mais limpo e com uma eficiência e performance na conversão esperadas.

4 METODOLOGIA

Para este trabalho, foi utilizada a metodologia baseada em Borschiver e Silva (2016), que é dividida em três etapas: pré-prospectiva, prospectiva e pós-prospectiva. A Figura 4.1 ilustra resumidamente como é feita e desenvolvida a prospecção tecnológica segundo esta metodologia.

Figura 4.1 - Metodologia de prospecção tecnológica.



Fonte: BORSCHIVER, SILVA (2016).

A fase pré-prospectiva é caracterizada pela pesquisa mais aprofundada sobre o objeto de estudo. Nesta etapa, são pesquisados os assuntos principais que permeiam o tema, que, posteriormente, serão agrupados em, pelo menos, três categorias: produto, tecnologia (ou processo) e mercado (TINÔCO *et al.*, 2020). Logo, na pesquisa preliminar para este trabalho, identificou-se que o adoçamento pode ser feito por alguns processos já conhecidos, como absorção, adsorção, membranas e criogenia (tecnologia), que esforços são feitos para buscar melhores absorventes, adsorventes, polímeros e membranas mais seletivos e com propriedades físico-químicas superiores (produto), sendo menos custosas, ambientalmente favoráveis e com melhor operacionalidade (impacto/aplicação).

A etapa prospectiva é dividida em duas fases: a definição da estratégia e a análise dos resultados. Nesta fase, são definidos o banco de dados que será utilizado, as palavras-chave que trarão os melhores resultados para o tema e o recorte temporal. Posteriormente, são analisados todos os documentos encontrados (TAVARES, BORSCHIVER, 2021, TINÔCO *et al.*, 2020).

Por fim, a etapa pós-prospectiva é qualificada pela construção do *roadmap* tecnológico. Com esta ferramenta visual, visualiza-se o nível de maturidade da utilização das tecnologias, as tendências a curto, médio e longo prazos e monitoramento dos principais atores do mercado. Neste recente trabalho, entretanto, esta etapa não foi desenvolvida (COELHO, BORSCHIVER, 2016).

4.1 LEVANTAMENTO DE ARTIGOS

Um artigo de pesquisa é um “texto com autoria declarada, que apresenta e discute ideias, métodos, processos, técnicas e resultados nas diversas áreas do conhecimento”, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os artigos podem ser classificados como um artigo de revisão e de pesquisa. Os primeiros são publicações feitas por especialistas que qualificam rigorosa e criteriosamente o que é produzido de uma determinada área. Para se criar um artigo de revisão, é necessário seguir um método de análise qualitativa para determinar o que é relevante para o trabalho (SOARES, PICOLLI, CASAGRANDE, 2018). Já os de pesquisa apresentam ideias e opiniões sobre determinado assunto (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2025).

Neste trabalho, apenas artigos de pesquisa foram considerados para as análises subsequentes. Os artigos de revisão foram utilizados para compor a base da etapa pré-prospectiva.

4.1.1 Etapa pré-prospectiva

Por meio de um estudo mais aprofundado do livro de Rahimpour, Makarem e Meshksar (2024) chamado *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications - Volume 2*, além da experiência profissional na área de Engenharia de Processos no desenvolvimento de projetos de engenharia detalhada em plataformas do tipo *Floating, Production, Storage and Offloading* (ou Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência, conhecidos como *FPSOs*) que possuem unidades de adoçamento de GN, definiu-se o foco desta investigação. Rahimpour, Makarem e Meshksar (2024) definem alguns processos de adoçamento de GN, com destaque para a absorção, adsorção, criogenia e membranas.

4.1.2 Etapa prospectiva

4.1.2.1 Base de dados

A base de dados escolhida foi a *Scopus*, da editora *Elsevier*. Considerado o maior repositório de literatura técnica, esta base de dados abrange diversas áreas, como Tecnologia, Saúde, Artes, Humanidades e Ciências, compreendendo 240 disciplinas. Comporta mais de 91 milhões de registros e de 292 mil livros de 1788 até a atualidade, produzidos por autores de diversos países (ELSEVIER, 2025). Consequentemente, pela amplitude das informações que podem ser encontradas, esta base foi escolhida para o desenvolvimento deste estudo.

4.1.2.2 Busca estratégica

Para alcançar o maior número de resultados, palavras-chave foram correlacionadas com os operadores Booleanos “*AND*” e “*OR*”, usados para restringir e expandir a busca. Os artigos científicos foram selecionados considerando a seção “*abstract*” (resumo) e um período de 10 anos (2015-2025). O Quadro 4.1 apresenta a estratégia de busca adotada neste estudo.

Quadro 4.1 – Estratégia de busca dos artigos na plataforma *Scopus* (*Elsevier*).

Pesquisa	Estratégia de busca	Seção	Faixa temporal
Adoçamento de gás natural por quatro diferentes processos	<i>Natural gas sweetening AND (absorption OR adsorption OR membrane OR cryogenics)</i>	<i>Abstract</i>	2015-2025 (maio)

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2.3 Análise dos resultados

A definição da busca estratégica resulta em um número relevante de artigos científicos que são agrupados e analisados em três níveis de detalhamento: Macro, Meso e Micro.

A análise Macro consiste em uma abordagem mais generalista de informações, em que os artigos são agrupados segundo seu ano de publicação, país de origem dos autores, e tipo de instituição (universidades, institutos de pesquisas ou empresas).

A análise Meso se baseia na proposta de taxonomias que representem as principais informações de interesse encontradas nos documentos selecionados.

Por fim, a análise Micro corresponde a um maior nível de detalhamento, usada para explicar as taxonomias propostas anteriormente, destacando, assim, as informações mais relevantes na prospecção técnico-científica.

4.2 LEVANTAMENTO DE PATENTES

A patente é um título e um direito de apropriação de autores, representados por pessoas físicas, empresas ou instituições públicas, sob suas invenções (um produto ou um processo), a fim de se evitar o uso inapropriado e sem o conhecimento e autorização do seu inventor. Dessa forma, terceiros são proibidos de produzir, vender, utilizar, importar sem o consentimento do autor por um determinado tempo de validade (PARANHOS, RIBEIRO, 2018).

Para Castro *et al.* (2022), essa proteção potencializa lucros obtidos por uma empresa com base em determinada inovação. Yang e Wang (2024) destacam a importância da proteção das patentes para regulamentação da concorrência empresarial, além da diminuição de possíveis transbordamentos de pesquisa e desenvolvimento, gerando fortalecimento da capacidade inovativa dos países e desenvolvendo-os.

4.2.1 Etapa pré-prospectiva

Assim como no levantamento de artigos, foram definidas as principais tecnologias utilizadas na atualidade na área de adoção de GN (absorção, adsorção, criogenia e membranas), escolhidas após leitura da publicação de Rahimpour, Makarem e Meshksar (2024) e trabalhos de engenharia de detalhamento em *FPSOs*.

4.2.2 Etapa prospectiva

4.2.2.1 Banco de dados

Para as patentes, foi escolhida a base de dados *Patentscope*, plataforma gratuita criada em 2005 pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual (*WIPO*). É possível encontrar documentos de dez idiomas depositados desde 1782 (PIRES, RIBEIRO, QUINTELLA, 2020). Além disso, até maio de 2025, já continha mais de 122,5 milhões de documentos de patentes e 5,1 milhões de documentos do Tratado de Cooperação entre os países participantes (*WIPO*, 2025).

4.2.2.2 Busca estratégica

Para a busca estratégica foram utilizados os operadores Booleanos “*AND*” e “*OR*”. A pesquisa foi filtrada no tempo entre os dias 01/01/2015 e 29/04/2025, no idioma inglês. A seção de busca das palavras-chave foi “página principal” e a análise dos documentos se concentrações na seção “reinvindicações”. O Quadro 4.2 indica como a pesquisa foi realizada.

Quadro 4.2 - Estratégia de busca dos artigos na plataforma *Patentscope (WIPO)*, usando a seção “página principal” e análise das “reinvindicações”.

Pesquisa	Estratégia de busca
Adoçamento de gás natural por quatro diferentes processos	“natural gas sweetening” AND (absorption OR adsorption OR cryogenics OR membrane) AND AD:[01.01.2015 TO 29.04.2025]

Fonte: Elaboração própria.

4.2.2.3 Análise dos resultados

Igualmente à análise de resultados do levantamento de artigos, as patentes encontradas foram selecionadas de acordo com o enfoque deste trabalho e, então, avaliadas segundo os níveis de detalhamento Macro, Meso e Micro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DOS ARTIGOS

Como descrito na Tabela 5.1, como consequência da busca estratégica, foram encontrados 116 artigos científicos. Foram definidos apenas artigos que abordaram inovações tecnológicas na área, como novas membranas e novas combinações de solventes. Logo, 86 documentos foram considerados relevantes para a próxima etapa da prospecção tecnológica.

Tabela 5.1 - Resultados da busca estratégica de artigos no *Scopus (Elsevier)* no período de 2015-2025 (maio), usando como critério de busca a seção *abstract*.

Tema	Número de Artigos Encontrados	Número de Artigos Relevantes
“Natural gas sweetening” AND (absorption OR adsorption OR membrane OR cryogenics)	116	86

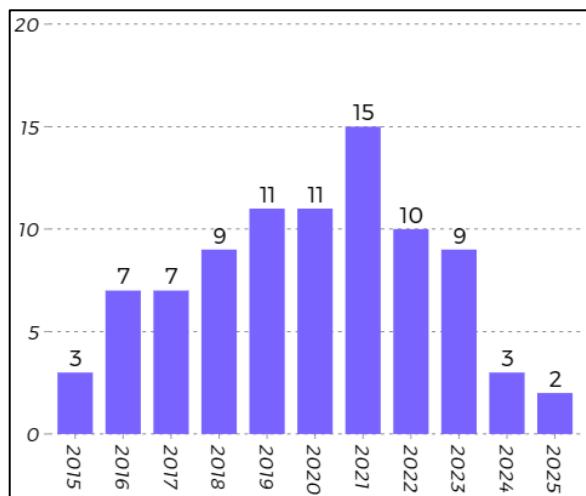
Fonte: Elaboração própria.

5.1.1 Análise Macro

5.1.1.1 Análise temporal

Os 86 artigos selecionados foram publicados ao longo de dez anos, compreendidos entre 2015 e 2025. A Figura 5.1 apresenta essa progressão temporal das publicações.

Figura 5.1 - Progressão temporal dos artigos.



Fonte: Elaboração própria.

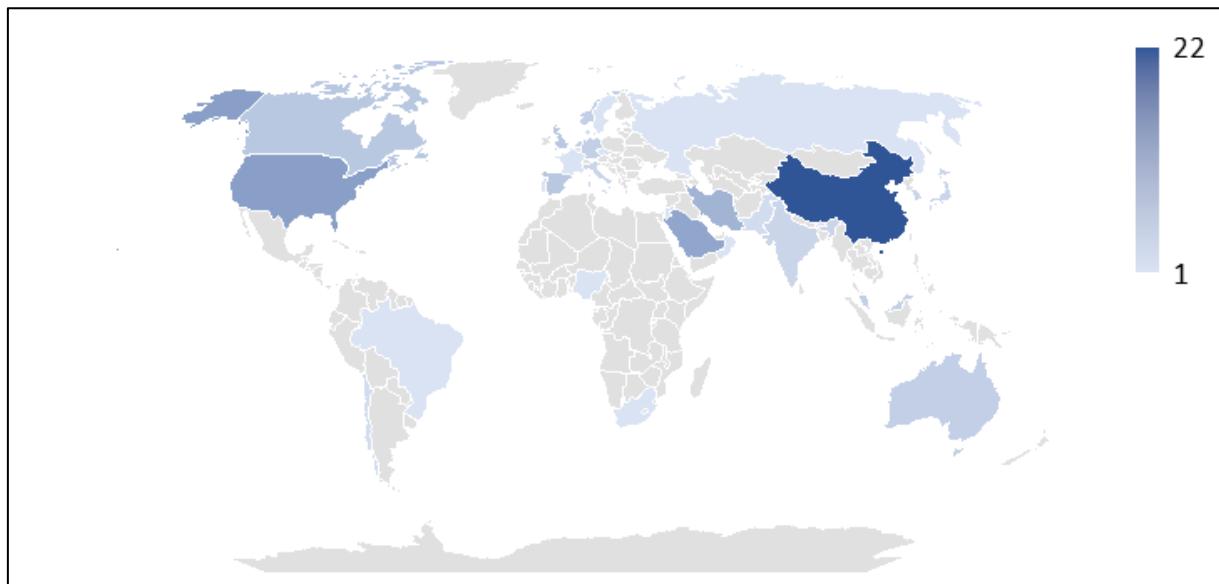
Observa-se um aumento no número de artigos publicados no período 2015-2021, que está atrelado ao interesse público em promover a transição energética mundial. Uma vez que o GN é um combustível fóssil gerador de baixo carbono, seu uso pode ser fundamental para essa transição. Entretanto, um comportamento atípico se comparado à tendência de publicações observada nos anos anteriores é observado no ano de 2024, que apresentou apenas 3 publicações. Já para o ano de 2025, uma análise sobre o número de artigos publicados (2) seria deficitária já que a busca estratégica foi definida até o mês de maio.

A Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP-21) ocorrida em 2015, em Paris, França, escancarou a necessidade de ação dos países para as questões climáticas. Uma das medidas propostas foi a destinação de US\$ 100 bilhões por ano pelos países ricos para projetos que visam a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas a partir de 2020 (REI, GONÇALVES, DE SOUZA, 2017).

5.1.1.2 Análise geográfica

A análise geográfica leva em conta o(s) país(es) onde está(ão) presente(s) a(s) universidade(s), o(s) instituto(s) ou a(s) empresa(s) em que o artigo foi desenvolvido, podendo ter mais de um país participante da mesma pesquisa. A Figura 5.2 apresenta a distribuição de artigos entre os países.

Figura 5.2 – Quantidade de artigos científicos publicados por país no período de 2015-2025 (maio) segundo dados da Scopus (Elsevier).



Fonte: Elaboração própria.

A maior quantidade de artigos publicados foi verificada pela China (22 documentos), seguida de Estados Unidos (11), Arábia Saudita (10) e Irã (8). Todos esses países possuem como objetivo desenvolver a produção de GN no mercado internacional, a partir de ações que viabilizem os avanços tecnológicos necessários para esse fim.

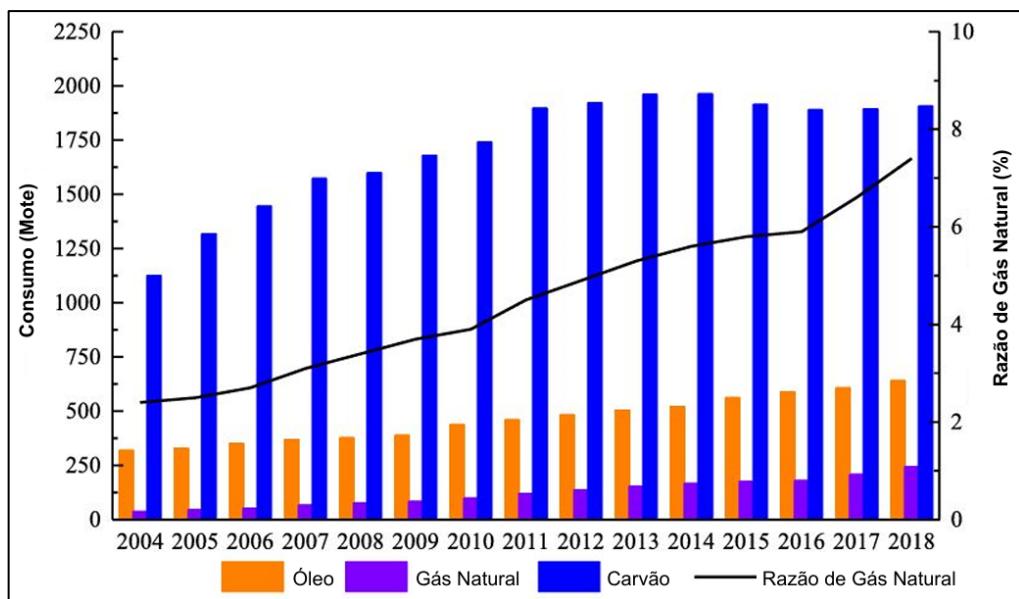
A China é a segunda maior economia do mundo e cresce rapidamente, respondendo por uma contribuição global de cerca de 30%. Consequentemente, o consumo energético apresenta uma tendência similar. Em mais de uma década (2009 a 2020), o país verificou o aumento do consumo primário de energia em 2,4 vezes (GUO *et al.*, 2017, MENG, SUN, WANG, 2022). Essas observações de crescimento foram também reportadas por Zhang *et al.* (2020), que atribuíram o aumento gradativo no consumo de GN à crescente urbanização, aquecimento econômico e desenvolvimento de políticas de baixo carbono promovidos pela China.

Devido aos desafios ambientais impostos pelos combustíveis fósseis, a necessidade de transição energética para meios com menor emissão de gases de efeito estufa (GEE) tem aumentado. A China tem como principal combustível o carvão, altamente nocivo ao meio ambiente. No entanto, um leve enfraquecimento no seu consumo tem sido observado a partir de 2014. Ao contrário, o GN, ainda incipiente no país (apenas 10% do consumo primário em 2023 – dados da *International Energy Agency* (2023)), tem apresentado uma taxa positiva de crescimento a cada ano (ZHANG *et al.*, 2020).

Adicionalmente, a China tem grandes reservas de GN ainda não exploradas, embora apresente uma demanda maior que a oferta devido às limitações técnicas ainda presentes no país. No entanto, avanços tecnológicos têm sido implementados na exploração e na extração de GN desde 2000. A construção de um gasoduto tem sido também conduzida, o que deverá beneficiar quase 10% da população. Como resultado, é esperada uma diminuição da dependência do carvão e um aumento da participação do GN na matriz energética chinesa (ZHANG *et al.*, 2020; YANG, 2018).

A Figura 5.3 ilustra como é repartido o consumo de energia chinês e a taxa de crescimento de GN no país.

Figura 5.3 - Consumo de energia primária na China entre 2004 e 2018.



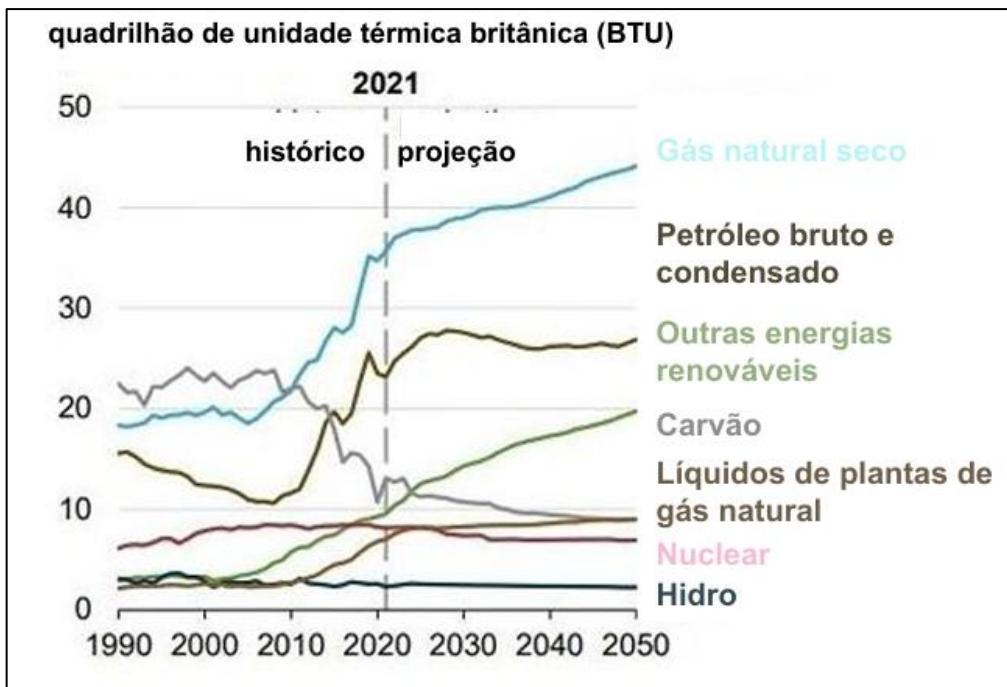
Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.* (2020).

Os Estados Unidos (EUA) apresentam cerca de 34% da demanda energética suprida por GN, depois do petróleo com aproximadamente 35%. Do montante de GN, cerca de 38% são direcionados à energia elétrica, 33% ao setor industrial, 15% à utilização doméstica, 10% ao comércio e 3% ao transporte, conforme dados da *International Energy Agency* (2021). O país ainda depende da importação da *commodity* para suprir o elevado consumo interno, bem como garantir o seu processamento e exportação (BARCELOS, 2023).

Os EUA apresentam uma estrutura propícia para o desenvolvimento do setor, com redes de gasodutos, mão de obra especializada e muitas empresas que participam de todos os níveis do mercado. Essa imponência foi construída sob duras atitudes, iniciando-se em 1945, com o acordo firmado entre o então presidente Franklin Roosevelt e o rei da Arábia Saudita, Abdul Saud, para o fornecimento de petróleo saudita a bons preços em troca de proteção à monarquia árabe (NETO, 2020). No final dos anos 1970 e início dos anos 1980, os EUA ainda obtinham o fornecimento do petróleo do Oriente Médio, sendo destacado pelo presidente da época, Jimmy Carter, que a mínima interferência externa no Golfo Pérsico poderia acarretar sanções ou até mesmo guerras (LEMOS, PACHECO, 2017).

Nos últimos anos, esforços têm sido realizados para o uso de combustíveis menos nocivos. A produção de carvão no país caiu para 11%, enquanto a demanda por GN aumentou. A Figura 5.4 apresenta a previsão de crescimento da produção de energia nos EUA até 2050. Nota-se um aumento na produção de GN seco e úmido, que deverá alcançar cerca de 53% da produção mundial em 2050) (MONTENEGRO, 2022).

Figura 5.4 - Previsão para a produção de energia nos Estados Unidos, em BTU.



Fonte: Adaptado de MONTENEGRO (2022).

A Arábia Saudita é uma monarquia do Oriente Médio, que apresenta importância econômica, política e religiosa (NUNES *et al.*, 2020). O país é um dos principais atores em conflitos na região, atuando como potencializador e apaziguador de disputas, muitas vezes com vieses religiosos, além de apresentar estreita relação com os EUA. Economicamente, figura-se entre as 20 maiores economias do mundo, sendo o único país árabe a participar do G20 (Grupo dos Vinte). No campo energético, é famoso pelas enormes reservas de petróleo e por ser um dos fundadores da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) (PINTO, 2015).

Fundada em 1960 em Bagdá (Iraque), a OPEP tem como objetivo fortalecer laços entre países cujas economias dependem, primariamente, da exploração de petróleo. Diante de uma conjuntura em que o mercado do petróleo era marcado pelo domínio de empresas estadunidenses e europeias, a OPEP foi uma forma de ampliar o protagonismo de outros países. Nesse contexto, Irã, Iraque, Kuwait e Venezuela, juntamente com a Arábia Saudita, lideraram a criação da OPEP, que, em seguida, incorporou países como o Catar (1961), Líbia (1962), Emirados árabes (1967), Nigéria (1971) e Equador (1973) (SILVA, 2021).

No início dos anos 1970, uma queda na produção de petróleo foi verificada pelos EUA, que acreditavam haver em uma tendência de constante declínio produtivo desse combustível, após um pico de produção. Diante disso, a OPEP, junto à União Soviética, passou a ditar os rumos da indústria de petróleo, se consolidando no mercado e criando uma relação de domínio

sobre outros países. A organização teve papel indiscutível na estabilização da oferta mundial nos momentos de crise, como na Guerra de *Yom-Kippur* (1973) e na Primeira Guerra do Golfo Pérsico (1990-1991). Sua posição privilegiada frente às políticas de produção de petróleo promoveu um aumento no poder de barganha, o que resultou em melhores condições no cenário mundial, como a transferência de tecnologia e maiores preços de venda (AZEVEDO, LEÃO, 2020). Em 2016, em meio à instabilidade e oscilação da oferta do petróleo, a OPEP+ foi criada entre os membros da OPEP (países exportadores de petróleo) e produtores como Rússia, Cazaquistão e México (SOARES, 2024).

A Arábia Saudita possui grandes reservas de petróleo e GN, sendo mais da metade da produção do tipo gás associado. Foi observado no país um crescimento anual médio de 2,7% na produção de GN entre 2008 e 2015, tendência que pode ser potencializada com a criação da Iniciativa Saudita de Gás (SGI) que visa o desenvolvimento da tecnologia de produção de GN a partir do investimento estrangeiro (SAYED, MASRAHI, 2023).

Por fim, o Irã é o terceiro maior produtor de GN do mundo, atrás apenas dos EUA e Rússia (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2022). Três marcos históricos marcaram a produção de GN iraniana (HAFEZI *et al.*, 2020).

O primeiro marco se originou entre as décadas de 1960 e 1970 com a queda na produção de GN, bem como com as exportações para Rússia por meio de um gasoduto. O segundo ocorreu entre as décadas de 1980 e 2000, quando o GN se tornou a principal fonte energética do país e desenvolvimentos em sua produção foram necessários para suprir a demanda interna, o que tornou o país um importante ator no cenário de exportação. O terceiro teve início a partir dos anos 2010, por meio de contínuos avanços no desenvolvimento dos campos de GN, considerados fatores determinantes para tornar o país notável no mercado mundial. Em 2019, o Irã ocupava a 35º posição no *ranking* de maiores exportadores de petróleo, representando 0,3% da fatia global. Atualmente, essa parcela corresponde a cerca de 2% (HAFEZI *et al.*, 2020).

A inexpressividade iraniana nas exportações de GN pode ser atribuída ao isolamento do país, embora essa realidade esteja mudando desde 2015. Anteriormente a esse período, era lei no Irã que todos os recursos naturais do país fossem explorados por empresas e instituições públicas, o que impedia a entrada de empresas estrangeiras e privadas no setor, exceto aquelas sob contratos com subsidiárias do país. A mudança começou a ocorrer a partir do acordo firmado com os EUA, chamado de *Joint Comprehensive Plan of Action (JCPOA)*, durante o governo de Barack Obama. Por meio desse acordo, o Irã era obrigado a parar de enriquecer

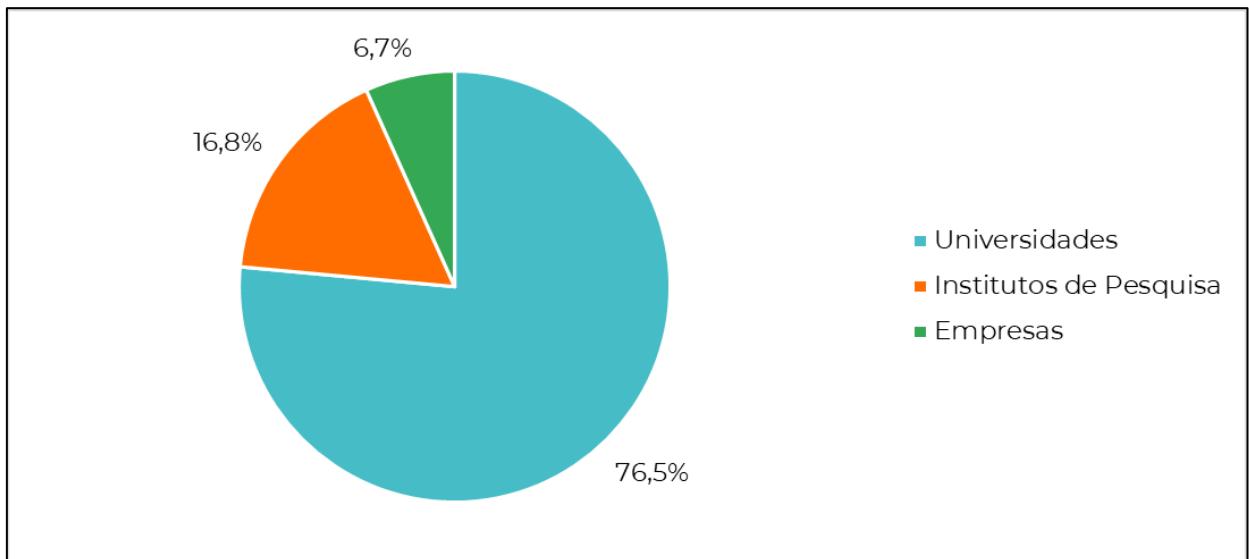
urânio e, em contrapartida, uma série de sanções econômicas seriam suavizadas, fazendo com que o país passasse a monetizar suas reservas de GN (BARCELOS, 2023).

O Irã continua tentando desenvolver sua produção e ampliar sua participação no mercado global de GN. O governo iraniano estima a necessidade de investimento de mais de US\$ 34 bilhões para a extensão da linha de gasodutos, compra de novos compressores de gás e perfuração de mais reservatórios, o que contribuirá para o aumento das oportunidades de mercado desse combustível (DUDLÁK, 2018).

5.1.1.3 Análise acadêmica e empresarial

Foram encontrados 119 institutos e centros de pesquisa, universidades e empresas relacionados aos artigos selecionados. A fatia correspondente aos autores dos artigos que pertencem a alguma universidade é maior que àqueles de institutos e empresas. A Figura 5.5 ilustra esses valores e essa distribuição.

Figura 5.5 - Distribuição de universidades, institutos de pesquisa e empresas dos artigos selecionados na base Scopus (Elsevier) no período 2015-2025 (maio).



Fonte: Elaboração própria.

Ao todo, 91 universidades foram identificadas, representando mais de 76% do total. Três universidades se destacaram: Universidade de Ciência e Tecnologia Rei Abdullah (Arábia Saudita), Universidade de Nanquim (China) e Universidade de Melbourne (Austrália), com a primeira sendo encontrada seis vezes e a segunda e a terceira, cinco vezes.

A Universidade de Ciência e Tecnologia Rei Abdullah (*KAUST*) está localizada na cidade de Thuwal, na Arábia Saudita. Sua fundação é do ano de 2009, sendo a primeira do país a aceitar homens e mulheres. O objetivo é a preparação para que profissionais sauditas possam atuar nos setores de energia, alimentos, tratamento de água e meio ambiente. A universidade oferece cursos de graduação e doutorado dentro de três grandes áreas: ciências e engenharia biológica e ambiental, computação e elétrica, e ciência e engenharia física. É possível se especializar em ciência das plantas, ciências marítimas, estatística e engenharia elétrica. Adicionalmente, ela conta com dez centros de pesquisa multidisciplinares e uma estrutura de laboratórios modernos e bibliotecas (*King Abdullah University of Science and Technology, 2025*).

A Universidade de Nanquim (NJU) está situada na cidade homônima, uma das mais importantes da China. Trata-se de uma instituição sucessora da Escola Normal de Sanjiang, fundada em 1902. Ao longo dos anos, essa escola evoluiu para outras três até se tornar a Universidade Nacional do Sul, em 1923. A evolução da universidade prosseguiu na sequência até que, em 1952, foi formada a Universidade de Nanquim. Atualmente, a universidade conta com quatro *campi* e oferece cursos nas áreas de ciência e tecnologia e humanidades para mais de 46 mil estudantes, sendo 1396 estrangeiros. Da área da tecnologia, são 11 laboratórios e centros de pesquisa (*Nanjing University, 2025*).

A Universidade de Melbourne é considerada a melhor da Austrália. Foi fundada em 1853, possuindo, atualmente, 7 *campi* distribuídos pelo país, sendo o mais antigo em Parkville. Abriga mais de 65 mil estudantes de graduação e pós-graduação australianos e estrangeiros nas áreas de ciências veterinárias e agricultura, artes, humanidades e ciências sociais, arquitetura, negócios e economia, educação, engenharia, meio ambiente, artes e música, saúde, tecnologia da computação e direito. O objetivo da universidade é formar profissionais altamente habilitados em atuar para a contribuição dos desafios sociais, políticos e econômicos que o mundo enfrenta e irá enfrentar (*The University of Melbourne, 2025*).

Em relação aos institutos e centros de pesquisas, foram encontrados 20 (cerca de 16% do total) com destaque para o Laboratório Nacional de Dalian para Energia Limpa (China). Em novembro de 2011, a China inaugurou o primeiro laboratório nacional de energia limpa e uso eficiente de combustíveis fósseis. O Laboratório Nacional de Dalian para Energia Limpa, na Península chinesa de Liaodong, tem o objetivo de estar coordenado com a estratégia de transição energética para uma política de baixo carbono. Com investimentos de mais de 37 milhões de dólares americanos na época, esse laboratório instaurou um importante

compromisso com a mudança da trajetória energética da China (CHEMISTRY WORLD, 2011).

Muitas empresas também têm participado de pesquisas com GN, tendo sido encontradas oito na busca estratégica, incluindo *Petronas* (Malásia), *Chevron* (EUA), *Sinopec* (China), *Saudi Aramco* (Arábia Saudita), *Solvay* (Bélgica), *Chemiewerk Bad Köstritz* (Alemanha), *Renco S.p.A* (Itália) e *SOLVIONIC* (França).

A *Petronas* é uma estatal de Kuala Lumpur na Malásia, fundada na década de 1970. A empresa comanda todas as reservas de petróleo e GN do país. Possui 86 filiais espalhadas pelo mundo e, como informado no site oficial da companhia, investe significativamente em pesquisa para melhorar a eficiência e a qualidade dos produtos. O portfólio da companhia inclui óleo e GN, petroquímicos, produtos de petróleo e soluções para energia mais limpa. Uma das metas da empresa é transacionar a energia para uma abordagem de baixo carbono até 2050 (PETRONAS, 2025).

A *Chevron*, criada em 1879, inicialmente chamada de *Pacific Coast Oil Co*, é considerada uma das maiores empresas estadunidenses na área de soluções para energia, atuando com óleo e GN (óleo no Cazaquistão, GN liquefeito na Austrália, gás de xisto *onshore* nos Estados Unidos e na Argentina, ativos em águas profundas no Golfo do México, e GN no Mediterrâneo), lubrificantes, químicos, aditivos e combustíveis (diesel e gasolina) para automóveis, navios e aeronaves (CHEVRON, 2025).

A *Sinopec*, ou *China Petroleum & Chemical Corporation*, é uma empresa de 2000 com um portfólio que abrange “a exploração e produção, transporte por oleoduto e venda de petróleo e GN; produção, venda, armazenamento e transporte de produtos de refinaria, produtos petroquímicos, produtos químicos de carvão, fibra sintética e outros produtos químicos; importação e exportação, incluindo serviços de agência de importação e exportação, de petróleo, GN, produtos petrolíferos, produtos petroquímicos e químicos, além de outras mercadorias e tecnologias; e pesquisa, desenvolvimento e aplicação de tecnologias e informações” (SINOPEC, 2025).

A *Saudi Aramco* iniciou suas atividades em 1933, quando o governo da Arábia Saudita assinou um acordo com a *Standard Oil Company of California (SOCAL)*. Dois anos depois, iniciaram a perfuração no deserto em busca de óleo, mas o sucesso só foi obtido em 1938, com a sua produção comercial. Investindo em pesquisa e desenvolvimento, a empresa inaugurou, em 1997, o *POWERS*, um simulador que modela a performance de grandes reservatórios. Esses investimentos balizam novas soluções para uma produção mais eficiente. Em seu portfólio, inclui-se produção de óleo e GN, químicos e lubrificantes (ARAMCO, 2025).

A *Solvay* é um grupo com sede em Bruxelas, na Bélgica, e presente em 41 países. Possui mais de 160 anos de história no setor químico. Dentre seus produtos, estão químicos básicos (barrilha e peróxidos), químicos de performance (como sílica), agroquímicos, soluções para indústria de alimentos, revestimentos, catalisadores e soluções de bateria para automóveis, soluções eletrônicas (como semicondutores) e soluções para as áreas de meio ambiente e energia (tratamentos de água, solo e ar, mineração, e óleo e gás) (SOLVAY, 2025).

A *Chemiewerk Bad Köstritz* produz especialidades da química orgânica há mais de 180 anos. A empresa alemã tem em seu portfólio a produção de sílica, compostos de enxofre (tiosulfatos e sulfitos) e peneiras moleculares (*Chemiewerk Bad Köstritz*, 2025).

A *Renco* é uma empresa italiana de engenharia e desenvolvimento de projetos, fornecendo soluções tecnológicas na área de energia e indústrias de gás, assim como no setor de construção civil. Opera há mais de 40 anos, sendo um dos atores para a transição energética (RENCO, 2025).

Por fim, a francesa *Solvionic*, fundada em 2003, se especializou na produção de líquidos iônicos. É considerada a única empresa do mundo capaz de produzir líquidos iônicos com pureza maior que 99,9%. Além dos líquidos iônicos, fabricam eletrólitos e sais metálicos (SOLVIONIC, 2025).

As universidades, centros de pesquisas e empresas dispõem de um importante papel nas soluções políticas, sociais, econômicas e ambientais necessárias para o presente e o futuro. Gubiani *et al.* (2013) indica que há uma nova economia baseada no conhecimento e que destaca as universidades e institutos de pesquisas como defensoras do conhecimento e da excelência na pesquisa e possuem enorme valor para a transferência de conhecimentos sob forma de avanços inovativos para o mercado. Junto delas, as empresas aplicam esse conhecimento compartilhado pelas universidades e institutos em desenvolvimento de serviços, produtos e bens de consumo mais alinhados com as necessidades da população e do mundo. As empresas, neste caso, “fazem a gestão do capital intelectual” e buscam constantemente a diferenciação para se manterem competitivas no mercado.

A Lei da Inovação de 2004 foi promulgada com o objetivo de aproximar os institutos e centros de pesquisas (ICTs) às empresas, por meio da transferência de conhecimento entre as partes. Entretanto, alguns entraves foram observados, como a “falta de um fortalecimento de uma cultura de proteção das novas tecnologias” e “falta de estímulo do pesquisador que atua nas universidades em transferir-se ao setor produtivo por algum tempo”. Posteriormente, o Marco Legal da Ciência, Tecnologia e Inovação (13.243/2016) foi criado para simplificar e solucionar esses entraves e fortalecer a cultura de inovação, com o fornecimento de bolsas para

ICTs prosseguirem com seus projetos de pesquisa (MIRANDA *et al.*, 2019). Todavia, no Brasil, esta parceria ainda não apresenta resultados expressivos. Para mudar esse cenário, Pinto (2021) acredita que é necessário o fomento da pesquisa nos ICTs e melhora na infraestrutura dessas instituições por parte dos agentes públicos.

A consequência do apoio a essa parceria, entretanto, é um “ganha-ganha” para ambas as partes. Bagnato *et al.* (2016) lista na Figura 5.6 as vantagens para ICTs e empresas que a parceria universidade-empresa (U-E) promove, como acesso a especialistas, laboratórios e demais estruturas que são inviáveis de ser mantidas economicamente.

Figura 5.6 - Vantagens para empresas e ICTs com a transferência de conhecimento.

Para a Empresa
1. Acessar especialistas, aos quais teria por muitas vezes dificuldades de ter e manter em seu quadro de funcionários;
2. Acessar laboratórios, equipamentos e técnicas que muitas vezes são economicamente inviáveis de manter em sua própria estrutura;
3. Acessar <i>Know How</i> restrito a poucas instituições no mundo;
4. Acessar pessoas com visão diferenciada em relação aos paradigmas da Empresa;
5. acessar recursos através de linhas de incentivos fiscais e fomento a pesquisa, reembolsáveis ou não;
6. Acessar graduandos, mestrando e doutorando com potencial para recrutamento de pessoal especializado.
Para as ICT
1. acessar informações de mercado e procedimentos de pesquisa da Empresa que podem contribuir na formação de seus alunos;
2. Acessar equipamentos e infraestrutura de produção e pesquisa não disponíveis em seus laboratórios;
3. Acessar recursos através de linhas de fomento a pesquisa não disponíveis em seus laboratórios;
4. Acessar recursos financeiros adicionais para realização de suas pesquisas;
5. Viabilizar a aplicação dos resultados de pesquisa, gerando riqueza e valor para a sociedade;
6. Possibilitar receitas adicionais através da remuneração pela Empresa pela exploração dos resultados de pesquisa.

Fonte: BARGNATO (2016).

Nesta busca estratégica, observa-se que poucas empresas foram encontradas (6% do total), o que pode indicar uma tendência global de pouca comunicação entre U-E. Entretanto, evidencia-se que, desta lista, há empresas que são referência mundial em suas respectivas áreas e que são conhecidas pelos seus massivos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, com destaque para as tecnologias de produção de GN.

5.1.2 Análise Meso

Cada artigo selecionado como relevante foi analisado segundo diferentes categorias, usadas para representar as principais informações sobre o adoçamento de GN. O Quadro 5.1 lista e descreve as taxonomias propostas neste trabalho.

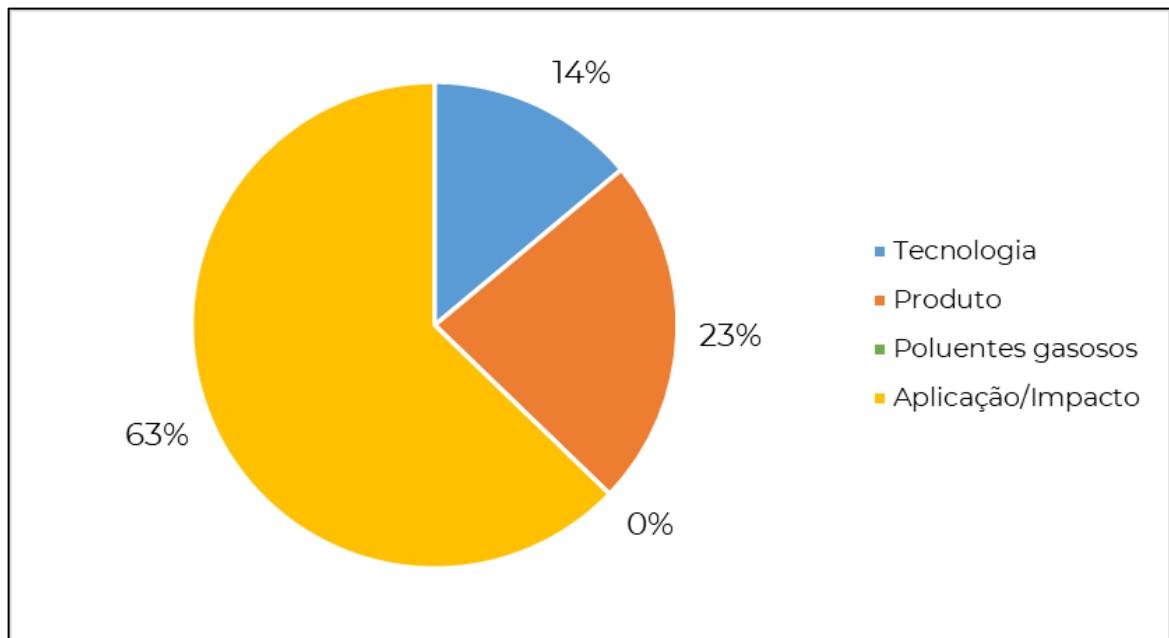
Quadro 5.1 - Análise Meso dos artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025.

Taxonomias	Descrição
Tecnologia	Principais processos para o adoçamento de gás natural.
Produto	Propriedades físico-químicas que agregam melhorias aos métodos propostos para o adoçamento de GN.
Poluentes Gasosos	Principais gases ácidos a serem removidos do gás natural.
Aplicação/Impacto	Impactos gerados do adoçamento de gás natural sobre a sua produção industrial.

Fonte: Elaboração própria.

Os artigos selecionados foram classificados segundo as taxonomias Meso, a partir do foco principal de suas pesquisas, conforme apresentado na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Distribuição dos artigos entre as taxonomias Meso.



Fonte: Elaboração própria.

Cerca de 63% dos artigos focaram na “Aplicação/Impacto”. Por conta dos desafios operacionais apresentados pelas tecnologias tradicionais, como o alto consumo energético e

espaços demasiadamente grandes, além da questão da eficiência da remoção, os pesquisadores concentram-se nas possibilidades de aprimoramento desta parte da operação. Sendo assim, é esperado que o foco dos artigos seja destinado a essa categoria. Ramezani *et al.* (2023), no artigo *Using a superstructure approach for techno-economic analysis of membrane processes*, realizaram um estudo técnico-econômico de uma membrana para a remoção seletiva de CO₂.

A taxonomia “Produto”, referente às propriedades fisico-químicas, ocupa a segunda posição com 23%. Avaliar as propriedades é importante para definir se os novos métodos são melhores que os originais e as características operacionais do processo. Ma *et al.* (2025), no artigo *Finely tailoring microstructure of hyperbranched polyimide membrane for facile natural gas upgrading*, desenvolveram uma estratégia para a preparação de membranas de poliimida e determinaram as características fisico-químicas por meio de algumas técnicas, como *Fourier Transform Infrared (FTIR)*.

Ocupando o terceiro lugar, a taxonomia “Tecnologia” foi o foco de 14% dos artigos. Esses artigos propuseram métodos novos, apresentando-os e explicando a melhoria que pode ser encontrada com a utilização dessas tecnologias. Este foi o caso de Huang *et al.* (2016), no artigo *Hydrophobic protic ionic liquids tethered with tertiary amine group for highly efficient and selective absorption of H₂S from CO₂*, ao propor um novo líquido iônico para a absorção de H₂S e CO₂.

Nenhum dos artigos focaram na taxonomia de “Poluentes Gasosos”. Isso pode ser explicado pela concentração de CO₂ ser, no geral, maior que de outros gases ácidos. Espera-se ter traços de componentes sulfurosos no GN, enquanto a fatia destinada ao CO₂ é relativamente maior. Boa parte dos artigos não focaram na remoção de outros gases ácidos e, como consequência, essa taxonomia não apresentou artigos relevantes.

5.1.3 Análise Micro

A Análise Micro dos artigos selecionados foi baseada nas taxonomias propostas, apresentadas no Quadro 5.2. Para uma melhor compreensão das taxonomias Meso, dois níveis de detalhamento foram usados na Análise Micro, denominados Micro I e Micro II.

Quadro 5.2 - Análise Micro dos artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025.

Meso	Micro I	Micro II
Tecnologia	Absorção	Líquido Iônico
		Solvente único
		Solventes Eutéticos Profundos (DES)
		Solvente Híbrido
	Membranas	Membrana de Matriz Mista (MMM)
		Polímeros
		Fibra Oca
		Membrana de Água
		Líquido Iônico + Membrana
		Zeólitas
	Adsorção	Estruturas Metalorgânicas (MOF)
		Carbonos Dopados
		Carvão Ativado
		Redes Poliméricas Porosas
		Zeólitas
		Sílica + Líquido Iônico
	Criogenia	--
Produto	Propriedades Físico-Químicas	Seletividade
		Estabilidade
		Corrosividade
		Forças intermoleculares
		Solubilidade
		Difusividade
		Permeabilidade
		Viscosidade
		Capacidade de absorção
		Porosidade
		Durabilidade
		Calor de adsorção
		Capacidade de adsorção
		CO ₂
Poluentes Gasosos	Gases ácidos	H ₂ S
		Outros
Aplicação / Impacto	Economia de Energia	--
	Econômica	--
	Escalabilidade	--
	Saúde e Segurança	--
	Operação / Otimização	--
	Melhora na Separação	--

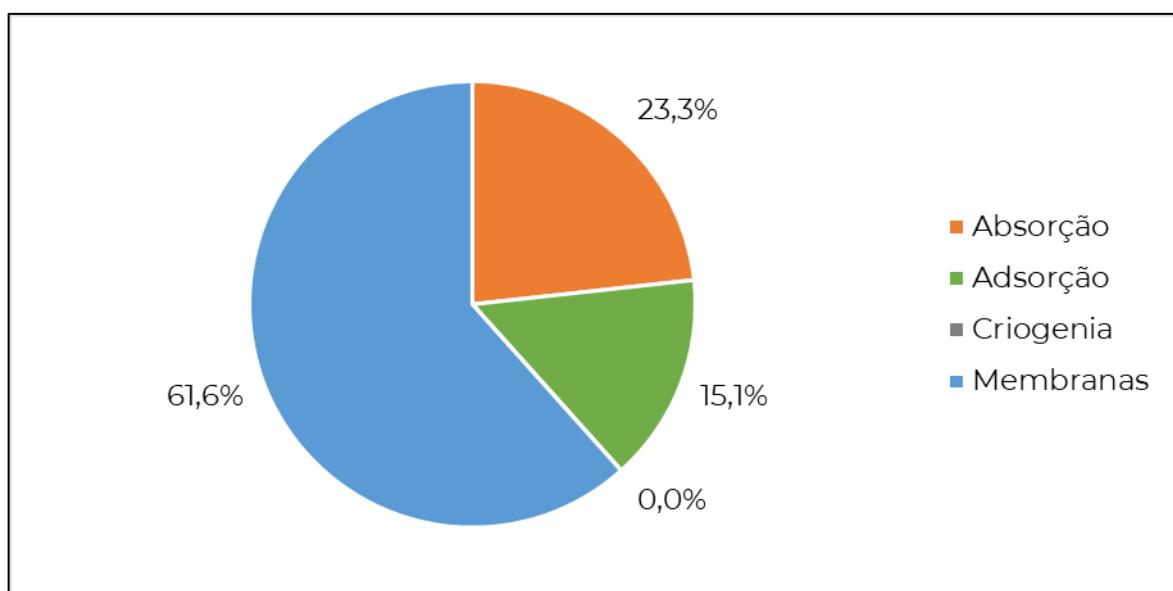
Fonte: Elaboração própria.

5.1.3.1 Análise Micro I

Tecnologia

A taxonomia “Tecnologia” foi dividida nas quatro principais metodologias usadas no mercado: absorção, membranas, adsorção e criogenia, descritas no capítulo 2.4.3 deste trabalho. A distribuição das tecnologias estudadas nos artigos relevantes selecionados está apresentada na Figura 5.8.

Figura 5.8 - Principais tecnologias de adoção de gás natural reportadas nos artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025.



Fonte: Elaboração própria.

Um pouco mais de 61% dos artigos foram dedicados às inovações no campo das membranas. Hazarika, Goswami e Ingole (2025), no artigo *Advances of membrane technology in gas separation*, enfatizaram que as membranas chamam a atenção de pesquisadores pelas soluções de energia e custos comparadas a outras tecnologias. Além disso, as propriedades multidimensionais das membranas podem contribuir para uma maior eficiência de separação, resultante de uma melhorada seletividade específica de gases e taxa de transferência de massa.

Em relação à absorção, 23,3% dos artigos selecionados focaram nesse processo. A absorção, principalmente química, tem sido largamente utilizada e de forma eficiente (RONDÓN, LUGO, 2025). A segunda posição pode ser explicada pela popularidade do método, embora apresente alguns desafios operacionais. Propor novas soluções em plantas já existentes ou, ainda, aproveitar o conhecimento da técnica por operadores são estratégias que

conferem vantagem ao adoçamento de GN. No artigo *Modeling CO₂ absorption in aqueous solutions of DEA, MDEA, and DEA + MDEA based on intelligent methods*, Aboooali, Soleimani e Rezaei-Yazdi (2020) desenvolveram um método de estimativa da capacidade de absorção de CO₂ em DEA, MDEA e na mistura dos dois solventes.

A abordagem relacionada a processos de adsorção foi verificada em 15,1% dos artigos selecionados. Essa tecnologia é mais eficiente para a retirada de CO₂ sob alta pressão parcial, regredindo a altas temperaturas (TAQVI *et al.*, 2024). É também um método promissor, uma vez que apresenta vantagens em relação à absorção, como o custo e a recuperação do material usado como adsorvente (SANTOS *et al.*, 2021). Wang *et al.* (2018), no artigo *Exploring the effect of ligand-originated MOF isomerism and methoxy group functionalization on selective acetylene/methane and carbon dioxide/methane adsorption properties in two NbO-type MOFs*, sintetizaram dois isômeros de estruturas metalorgânicas (MOFs), formados a partir de ligantes di-isoftalato funcionalizados com metoxi, e investigaram a adsorção de CO₂ e CH₄, concluindo que esse método de adsorção é promissor para a separação de gases.

Nenhum dos artigos encontrados abordaram a criogenia como método de adoçamento de GN. A potencialidade dessa tecnologia é elevada, principalmente quando comparada à absorção por solução de aminas. Entretanto, tendo em vista que a baixa concentração de gases ácidos, principalmente o H₂S, manter a temperatura negativa ideal para o processo é demasiado custoso. Portanto, os custos de energia e de operação podem ser altos tornando essa tecnologia comercialmente inviável (SONG *et al.*, 2019).

Produto

A taxonomia “Produto” referiu-se a todas as propriedades físico-químicas analisadas nos artigos científicos, como a porosidade em processos de adsorção, a permeabilidade em processos de membranas e a capacidade de absorção em processos de absorção. No artigo *Solubility of carbon dioxide in promising methylimidazolium-based ionic liquids* de Henni, Henni e Ibrahim (2023), a capacidade de absorção de CO₂ em três líquidos iônicos promissores foi estimada por meio da Lei de Henry. Ahmadijokani *et al.* (2020) no artigo *Impact of scale, activation solvents, and aged conditions on gas adsorption properties of UiO-66* também estimaram a capacidade de adsorção, além da estabilidade, do CO₂ em uma MOF de nanopartículas de UiO-66 ativado com clorofórmio. Neste estudo, foi identificado a boa estabilidade estrutural deste material e a capacidade de adsorção que se manteve inalterada após cinco ciclos consecutivos de adsorção-dessorção.

Poluentes gasosos

Os gases ácidos são variados, incluindo o CO₂, H₂S, sulfetos, mercaptanos, tióis e tiofenos (AGUIAR, 2016). No artigo *Novel porous organic polymer for the concurrent and selective removal of hydrogen sulfide and carbon dioxide from natural gas streams* de Abdelnaby *et al.* (2020), um novo polímero poroso chamado KFUPM-5 foi estudado para a separação de CO₂ e H₂S. Entretanto, no artigo de Scholes (2021) denominado *Blended perfluoropolymer membranes for carbon dioxide separation by miscible and immiscible morphologies*, apenas a separação do CO₂ foi analisada ao utilizar uma mistura de dois perfluoropolímeros (Teflon AF1600 e Hyflon AD6).

Impacto/Aplicação

As aplicações relacionadas à tecnologia de adoçamento de GN foram divididas em economia de energia, melhoria econômica, escalabilidade, operação/otimização, saúde e segurança e eficiência de separação.

A economia de energia é essencial, uma vez que contribui para os custos do processo. Ellaf *et al.* (2023), no artigo *Energy, exergy, economic, environment, exergo-environment based assessment of amine-based hybrid solvents for natural gas sweetening*, evidenciaram a economia de energia em processo utilizando solvente híbrido. No artigo, o uso de MDEA combinado com sulfolano (2,3,4,5-tetraidrotifeno-1,1-dióxido) foi comprovado ser um processo mais eficiente do ponto de vista energético, reduzindo os custos no processamento de GN.

A decisão da escolha de uma tecnologia também permeia os custos que a operação causaria a uma empresa. Abéjon, Casado-Coterillo e Garea (2022), no artigo *Techno-economic optimization of multistage membrane processes with innovative hollow fiber modules for the production of high-purity CO₂ and CH₄ from different sources*, promoveram uma análise técnico-econômica do uso de membranas para três processos distintos: purificação de biogás, adoçamento de GN e recuperação avançada de petróleo. Em todas as aplicações, uma separação com membrana de fibra oca foi realizada. O processo de adoçamento de GN usando membranas apresentou uma diminuição dos custos totais, os quais incluíam custos operacionais (mão-de-obra e substituição da membrana) e custos de perdas. Implantado o *design* adequado, os custos operacionais com essa membrana podem ser da ordem de US\$ 0,05/m³ STP (temperatura e pressão padrão).

Outro impacto relevante é o da escalabilidade. Uma combinação de membrana de alta pressão e regeneração convencional por amina foi proposta por Quek, Shah e Chachuat (2021),

no artigo *Plant-wide assessment of high-pressure membrane contactors in natural gas sweetening—Part II: Process analysis*. A pesquisa foi realizada em uma escala piloto, considerando uma visão comercial. Foi notado alta escalabilidade do projeto, o que poderá promover uma intensificação do potencial de melhoria no espaço e na demanda energética em comparação com plantas de aminas.

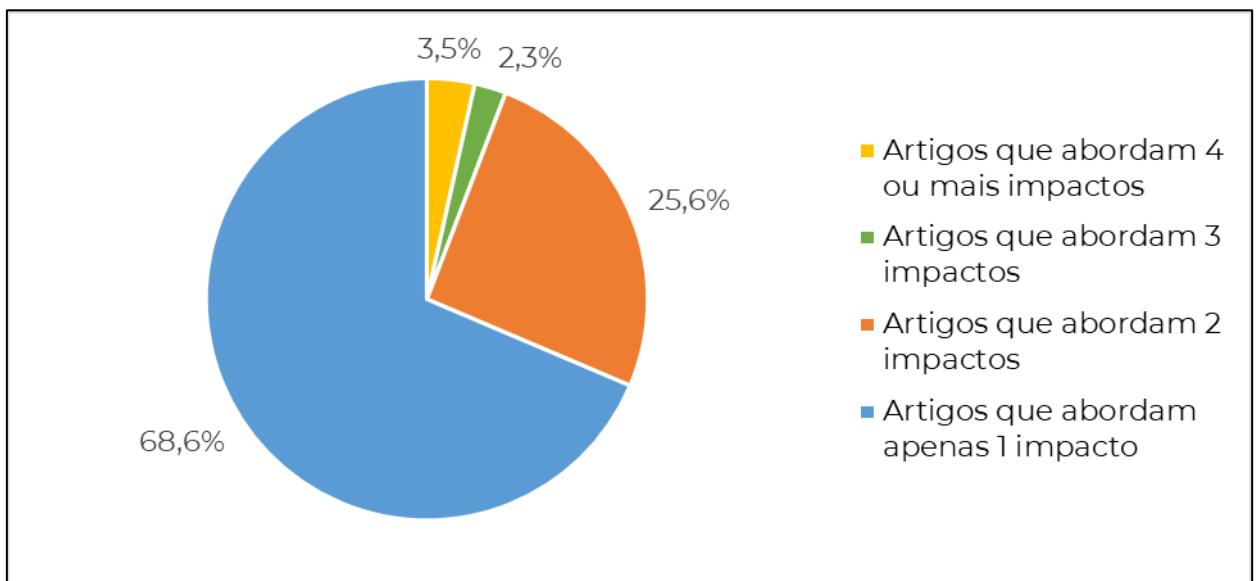
O entendimento de um processo também permeia as variáveis operacionais, como pressão, temperatura e vazão do gás. A investigação dessas variáveis é determinante para o alcance de processos de separação de GN altamente eficientes. Norouzbahri e Gharibi (2020), no artigo *UV cross-linked poly (ethylene glycol)-based membranes with different fractional free volumes for CO₂ capture: synthesis, characterization, and thiol-ene modification evaluation*, empregaram membranas amorfas de polietilenoglicol reticuladas por ultravioleta (UV) para a separação de CO₂. A permeação do gás foi analisada em faixas de temperatura (308–348 K) e de pressão (2–16 bar), sendo constatado melhores resultados sob altas temperaturas.

O impacto na saúde e segurança dos funcionários de uma planta de tratamento de GN foi abordado por Gutierrez, Atilhan e Aparicio (2017), no artigo *Microscopic characterization of CO₂ and H₂S removal by sulfolane*. Os autores investigaram a utilização de sulfolano, como solvente único para a absorção de gases poluentes. Para atingir as especificações do gás, seria necessária uma grande quantidade do solvente, o que implicaria em um estudo mais aprofundado sobre a sua toxicidade nos seres humanos. No entanto, um estudo sobre a citotoxicidade foi conduzido por meio do uso de bicamada lipídica contendo fosfolipídios. Foi concluído que ainda não há estudos tão completos sobre a atividade das células em contato com o sulfolano, mas que esse composto é capaz de atravessar paredes celulares.

O aprimoramento na separação/purificação do GN foi estudado pela maioria dos autores. Ma *et al.* (2025), no artigo *Finely tailoring microstructure of hyperbranched polyimide membrane for facile natural gas upgrading* utilizaram uma nova estratégia para produzir membranas de poliimida com estruturas hiperramificadas, copolimerizando a triamina em conjunto com o 4,4'-(hexafluoroisopropileno) anidrido diftálico-2,2-bis(3-amino-4-hidroxifenil)-hexafluoropropano (6FDA-6FAP) linear. A mudança na forma de produzir a membrana causou o aumento do empacotamento e avanço relevante da seletividade na separação CO₂/CH₄.

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam a distribuição dos impactos observados na aplicação da tecnologia de adoção de GN nos artigos relevantes selecionados neste estudo.

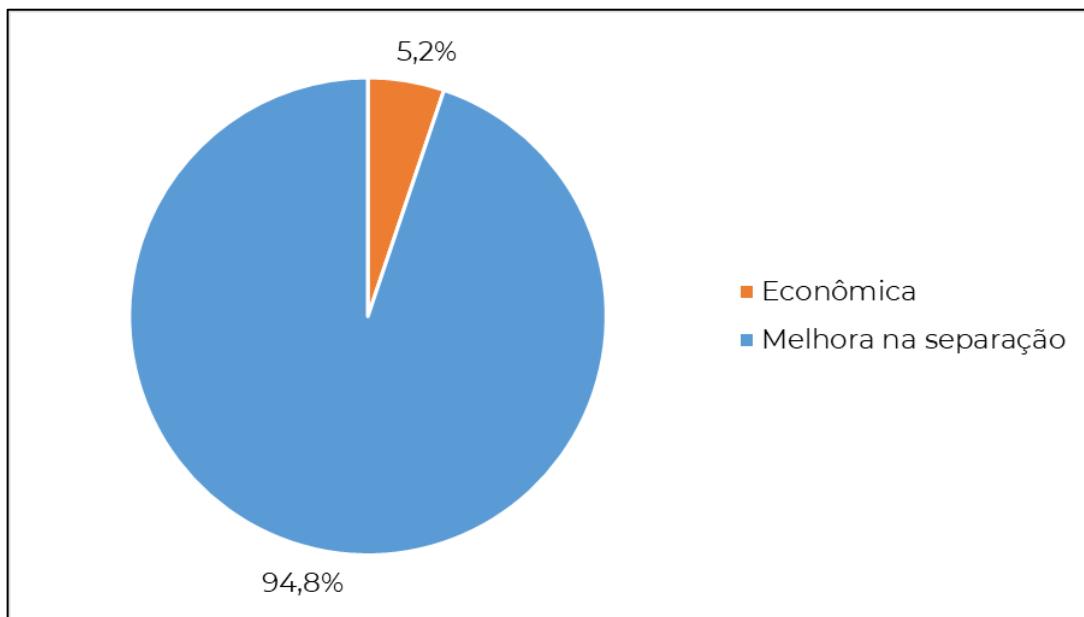
Figura 5.9 – Quantidade de impactos abordados nos artigos selecionados na base *Scopus* (*Elsevier*) no período 2015-2025.



Fonte: Elaboração própria.

Mais de 68% dos artigos abordaram apenas um tipo de impacto em suas inovações propostas, enquanto cerca de 32%, correspondente a 27 artigos, abordaram mais de um tipo de impacto. Sendo assim, as inovações propostas, quando aplicadas em plantas de processamento de GN, podem causar mais de um efeito positivo em detrimento aos métodos já utilizados.

Figura 5.10 - Distribuição dos artigos selecionados na base *Scopus* (*Elsevier*) no período 2015-2025 que abordaram apenas um tipo de impacto.



Fonte: Elaboração própria.

Considerando apenas os artigos que abordaram um tipo de impacto (Figura 5.14), de um total de 58 documentos, 55 focaram na melhoria da separação, enquanto 3 se concentraram na economia de custos. A aplicação na escalabilidade, saúde e segurança e operacionalidade foram abarcados sempre quando combinados com outros tipos de impacto. Mozafari *et al.* (2019), no artigo *Amine–membrane hybrid process economics for natural gas sweetening* fizeram um estudo econômico de um sistema híbrido amina-membrana de um e dois estágios para a retirada de impurezas. Na análise, foi concluído que a utilização de membranas de dois estágios de acetato de celulose no sistema híbrido não é o ideal. Em contrapartida, a aplicação de um sistema híbrido de membrana de estágio único, quando empregada para alimentação com alto teor de gases ácidos, demonstra competitividade em relação à uma unidade de tratamento utilizando aminas. Isso é devido à redução do Custo Operacional Total (TOC), que ocorre juntamente com um pequeno aumento no Investimento de Capital Total (TCI). Já no artigo *Ultraselective glassy polymer membranes with unprecedented performance for energy-efficient sour gas separation* de Yi *et al.* (2019a), o foco foi a eficiência na remoção de H₂S. Os autores indicam que uma membrana funcionalizada com amidoxima apresenta seletividade e permeabilidade extraordinárias se comparadas às membranas vítreas poliméricas comerciais.

5.1.4 Análise Micro II

5.1.4.1 Tecnologias de Absorção

No nível Micro II, os artigos que abordaram processos de absorção foram separados entre os métodos de líquido iônico, solvente único e híbrido.

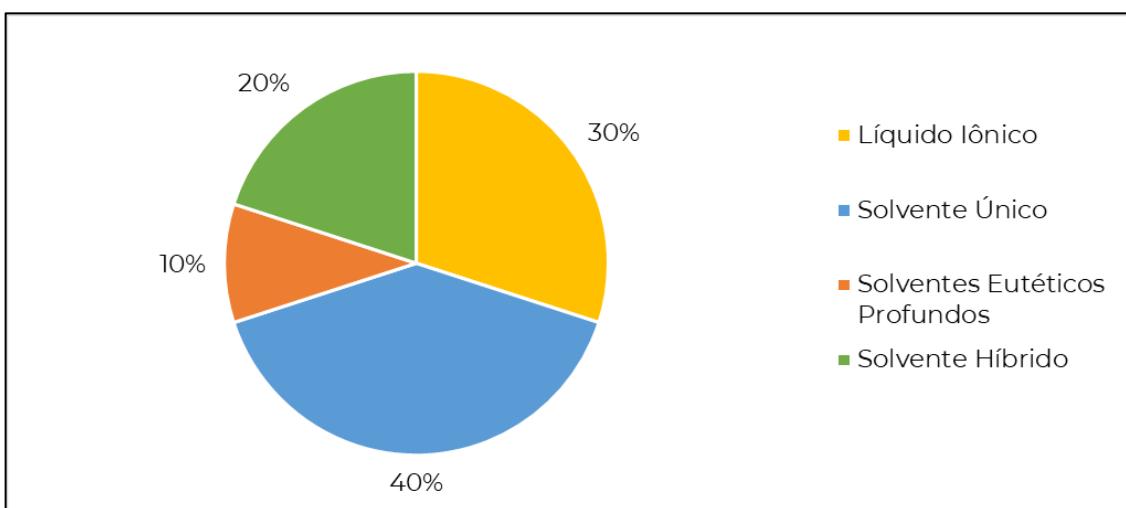
Líquidos iônicos são soluções salinas com baixo ponto de fusão e que se deterioram sob altas temperaturas (cerca de 300 °C). Por serem formados por uma parte catiônica e outra aniónica, esses líquidos apresentam características superiores às de solventes convencionais e podem ser utilizados como solventes pela capacidade de absorver diversos tipos de compostos, como os não polares, polares, inorgânicos e materiais poliméricos (BORJA, 2015). Kazmi *et al.* (2021), no artigo *Energy, exergy and economic (3E) evaluation of CO₂ capture from natural gas using pyridinium functionalized ionic liquids: A simulation study*, completam que os líquidos iônicos oferecem menores entalpias de solução e pressão de vapor, tornando-os mais eficientes energeticamente que os solventes tradicionais. Neste artigo, um líquido iônico à base de cátion piridínio foi comparado à MEA e ao 1,2-dimetoxietano (DME) em termos de energético, exergético e econômico.

A absorção com apenas um solvente pode ser escolhida em termos de custos operacionais e necessidade que o sistema apresenta, como mostrado no artigo *Simulation and optimization of the acid gas absorption process by an aqueous diethanolamine solution in a natural gas sweetening unit* de Darani *et al.* (2021). A remoção de CO₂ com amina DEA foi estudada sob três parâmetros operacionais: concentração da amina (25, 28 e 30% em peso), taxa de circulação de amina pobre (220, 240 e 260 m³/h) e temperatura (40, 50 e 60 °C). Entretanto, a combinação de solventes pode ser realizada, uma vez que pode aumentar a eficiência do processo. Suleman *et al.* (2021), no artigo *A simple model for estimating hydrogen sulfide solubility in aqueous alkanolamines in the high pressure-high gas loading region*, estimaram a solubilidade do H₂S no MEA, DEA, MDEA, N-metildietanolamina, 2-amino-2-metil-1-propanol, piperazina, diglicolamina, di-isopropilamina e 1-amino-2-propanol e também com misturas selecionadas, alterando as condições de carga de H₂S, temperatura do processo e concentração do solvente (ou da mistura).

Os solventes eutéticos profundos (DES) são considerados os solventes mais verdes e promissores para a separação de gases, por serem biodegradáveis, renováveis e possuem baixo custo. São formados por pelo menos um doador de hidrogênio (HBD) e um aceitador de hidrogênio (HBA). A interação desses compostos é responsável pela mistura eutética com ponto de fusão menor que do HBA e HBD. Os DES também são vantajosos por não necessitarem de etapas de purificação e pela grande variedade de HBDs e HBAs disponíveis no mercado. Sendo assim, um grande número de combinações pode ser feito, potencializando propriedades físico-químicas como densidade e viscosidade (WEIKERT, 2021). Shi *et al.* (2022), no artigo *Highly efficient and selective H₂S capture by task-specific deep eutectic solvents through chemical dual-site absorption*, avaliaram a viscosidade de cinco solventes eutéticos profundos (DES) utilizados para a absorção de H₂S, verificando uma redução nos seus valores conforme o aumento da temperatura.

A Figura 5.11 ilustra como ficou a distribuição entre as inovações propostas para esse nível.

Figura 5.11 – Distribuição dos artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025 em função dos métodos de absorção.



Fonte: Elaboração própria.

5.1.4.2 Tecnologias de Adsorção

Os métodos abordadas na categoria de tecnologias de adsorção foram as estruturas metalorgânicas, carbonos dopados, carvão ativado, sílica e zeólitas, conforme Figura 5.12.

As estruturas metalorgânicas, também conhecidas do inglês *metal-organic frameworks* ou pela sigla (MOF), apresentam enorme potencial dentro da área de separação de gases. Estas estruturas apresentam até 90% de volume de poros e área de superfície de até 6000 m²/g (DOMÍNGUEZ, 2015). A estrutura é formada por centros metálicos e ligantes orgânicos. O potencial deste método se encontra na variedade de metais e ligantes orgânicos que podem ser combinados (PHILIPPI, 2017). Sin *et al.* (2019), no artigo *In Situ ¹³C NMR spectroscopy study of CO₂/CH₄ mixture adsorption by Metal–Organic Frameworks: does flexibility influence selectivity?*, investigaram como a influência da flexibilidade da estrutura afeta a seletividade de adsorção. Para isso, utilizaram estímulos na temperatura, pressão e na presença de moléculas hospedeiras, a fim de criar duas MOFs flexíveis (DUT-8(Ni) e SNU-9).

Os carbonos dopados são estruturas carbônicas, como grafeno, grafite, carbonos porosos e nanofibras, modificadas com a inserção de heteroátomos, como nitrogênio, enxofre, fósforo, boro, entre outros, resultando na melhora da adsorção e na interação entre compostos (MA, NING, WEI, 2022). No estudo de Saha *et al.* (2017), no artigo *Adsorptive separation of CO₂ in sulfur-doped nanoporous carbons: selectivity and breakthrough simulation*, os carbonos porosos foram dopados com enxofre. O resultado foi o aumento da área superficial, variando de 837–2865 m²/g. O calor de adsorção atingiu valores entre 60–65 kJ/mol, sendo o mais alto

para adsorção de CO₂ entre carbonos porosos. Além disso, houve aprimoramento da seletividade de CO₂ quando comparado ao carvão ativado comercial.

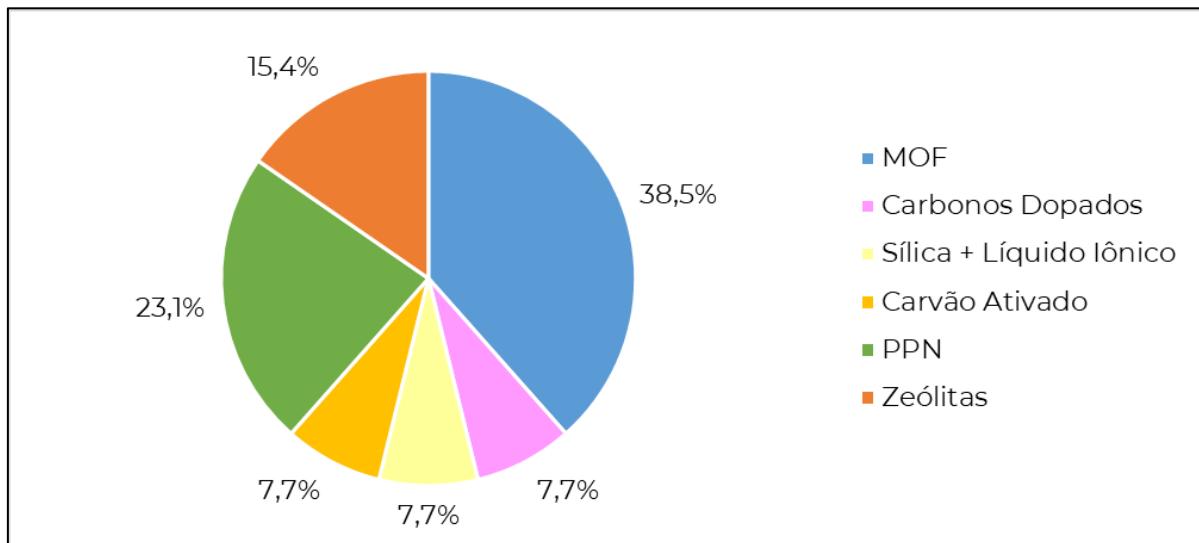
O carvão ativado é utilizado em uma série de processos além da separação de gás, como purificação de água e descoloração de açúcar. São formados por meio da decomposição de turfa, betuminosos, casca de coco e madeira e a ativação é feita com a exposição do material a vapor de água ou CO₂ a temperaturas entre 700 °C e 1100 °C (MATIELLO, 2017). Simulações de um modelo atomístico do adsorvente de carvão ativado foi utilizado por Bahamon *et al.* (2020), no artigo *Performance of activated carbons derived from date seeds in CO₂ swing adsorption determined by combining experimental and molecular simulation data*, para a separação de CO₂ da corrente de metano. Foram calculadas as isotermas de adsorção e calores isotérmicos para avaliar a capacidade de adsorção do carvão ativado na captura deste gás ácido. O resultado mostrou que uma pequena quantidade de água pré-adsorvida pode melhorar a separação em ciclos específicos sob baixa pressão.

A sílica é um material da família dos mesoporos (diâmetro entre 2 a 50 nm) muito utilizada na separação de gases e catálise. Os poros possuem formatos cilíndricos hexagonais, o que auxilia na remoção de poluentes em correntes gasosas. A incorporação de líquidos iônicos nos poros pode aumentar a adsorção de CO₂ na estrutura, como foi observado no estudo de Kumar e Kumar (2018), chamado *Enhanced CO₂ adsorption and separation in ionic-liquid-impregnated mesoporous silica MCM-41: a molecular simulation study*.

Zeólitas são materiais cristalinos e microporos que podem ser naturais ou sintetizadas. As redes cristalinas são formadas por estruturas tetraédricas de SiO₄ ou AlO₄. O fato dos poros das zeólitas serem muito pequenos é considerado uma vantagem na separação, conferindo enorme valor comercial (ZEN, 2016). Adsorventes de zeólita 4A sem aglutinantes foram avaliados para a separação CO₂/CH₄ e N₂/CH₄ e apresentados no artigo *Adsorption equilibrium and kinetics of carbon dioxide, methane and nitrogen on binderless zeolite 4A adsorbents* de Seabra *et al.* (2019).

Lu *et al.* (2022), no artigo *High-throughput computational screening of porous polymer networks for natural gas sweetening based on a neural network*, explicam que as redes poliméricas porosas (PPNs), materiais construídos a partir de monômeros rígidos, são compostos por elementos não metálicos conectados por ligação covalente. O uso das PPNs é destacado por apresentarem alta porosidade, elevada área superficial, boa estabilidade e baixo custo. Essas características tornam as PPNs promissoras no cenário da separação de gases. No estudo, foram avaliadas 17846 PPNs com topologias parecidas com o diamante para o adsorvente ótimo para a separação de gases.

Figura 5.12 - Distribuição dos artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025 em função dos métodos de adsorção.

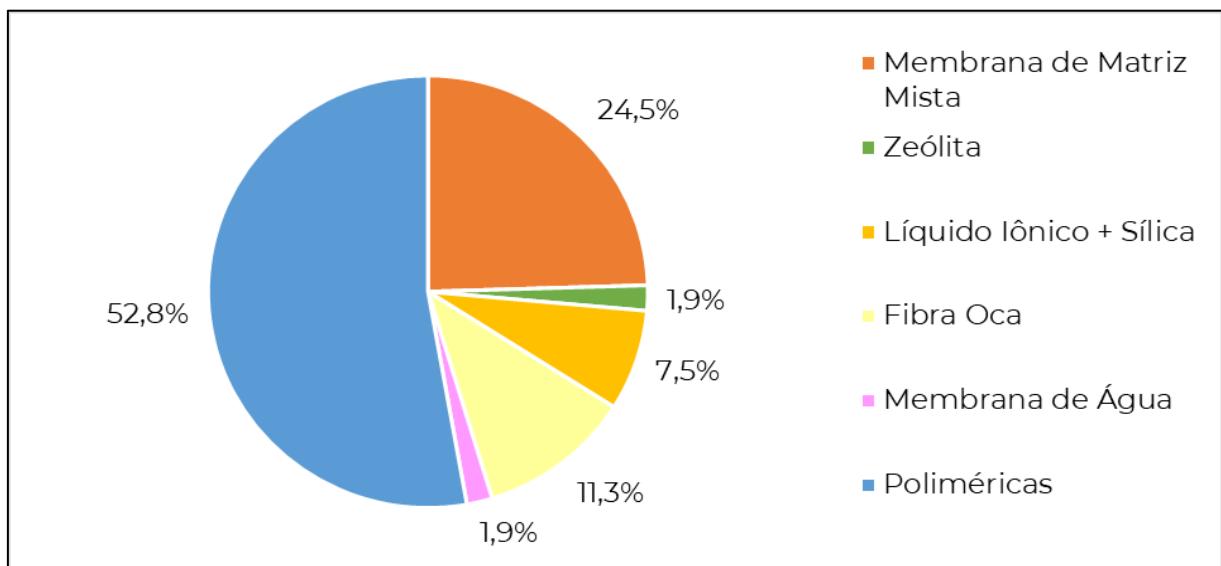


Fonte: Elaboração própria.

5.1.4.3 Tecnologias de Membranas

Como mostrado anteriormente, os processos com membranas foram os mais estudados nos artigos selecionados. A Figura 5.13 ilustra a distribuição de todas as membranas abordadas, indicando o predomínio do estudo de membranas poliméricas típicas, seguindo de membranas de matriz mista e fibra oca.

Figura 5.13 - Distribuição dos artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025 em função dos métodos de separação por membranas.



Fonte: Elaboração própria.

As membranas poliméricas simples, principalmente polissulfona e acetato de celulose, são comumente utilizadas na separação de CO₂/CH₄ e atendem boa parte do mercado. Entretanto, novos compostos como poliimidas e policarbonatos e poliararamidas estão sendo utilizados neste setor. Em 2017, seu uso correspondia a 10% do mercado de separação de gás. Um dos problemas das membranas é o risco à plastificação (MORETH, 2022). Uma membrana de espirodifluoranteneno foi estudada no artigo de Han *et al.* (2021), denominado *Ultrapermeable polymeric membranes based on particular ultra-rigid units for enhanced gas separation*. Essa membrana polimérica apresenta melhor estabilidade térmica e alta área superficial, que varia de 804 e 895 m² g⁻¹.

A membrana de fibra oca é um tipo de membrana que apresenta espaço vazio em seu interior. Sua vantagem é a maior razão área/volume, o que possibilita maior volume de permeado. Entretanto, corre o risco maior de entupimentos (OLIVEIRA, 2021). Liu *et al.* (2021) formularam uma membrana de fibra oca a base de trietileno glicol monoesterificado reticulado (TEGMC) e apresentaram no artigo *Natural gas sweetening using TEGMC polyimide hollow fiber membranes*. A presença de compostos mais pesados, como etano, propano e tolueno, inesperadamente, resultou no aumento da seletividade de H₂S/CH₄ e CO₂/CH₄. Os hidrocarbonetos condensáveis reduzem a permeação de CH₄ devido à sorção competitiva, enquanto a permeação de H₂S e CO₂ permanece praticamente inalterada.

A membrana de água é formada por um suporte coberto de uma camada fina de água. A água não permeia através do suporte pela hidrofobicidade da superfície. Quando o gás natural atravessa pela membrana, o CO₂, por exemplo, que tem duas vezes maior solubilidade na água que outros gases, como CH₄, fica retido nesta camada, enquanto os outros gases permeiam por ela. Este estudo foi elaborado por Jung (2018), no artigo *Water membrane for carbon dioxide separation*.

As membranas de matriz mista (MMM) são sintetizadas com a incorporação de materiais inorgânicos em matrizes de polímeros. Com isso, há a possibilidade de aumento da seletividade e permeabilidade em uma separação gasosa, uma vez que combinam-se características de dois materiais distintos a fim de potencializar os resultados (MORETH, 2022). No estudo apresentado no artigo *Synthesis and fabrication of adsorptive carbon nanoparticles (ACNs)/PDMS mixed matrix membranes for efficient CO₂/CH₄ and C₃H₈/CH₄ separation* por Heidari *et al.* (2019), membranas de matriz mista de polidimetilsiloxano (PDMS-MMMs) contendo nanopartículas de carbono microporosas adsorventes (ACNs), que foram produzidas por meio de pirólise de um precursor de resina fenólica a 700 °C. Além disso, as ACNs preparadas foram subordinadas a um tratamento com ozônio. Com isso, houve

aumento da eficácia em termos de capacidade de sorção e redução de limitações difusionais. A avaliação quanto à solubilidade, aos coeficientes de difusividade e à permeabilidade e seletividade ocorreu com MMMs possuindo quantidades distintas de ACNs nativas (ACN-N) e ACNs oxidadas (ACN-O).

A combinação entre líquido iônico incorporado a membranas possui o foco em aprimorar as vantagens de separação. Esta forma de utilizar as membranas é devida à alta seletividade dos líquidos iônicos para absorção por alguns compostos, como o CO₂ (ABEJÓN, CASADO-COTERILLO, GAREA, 2022). No artigo *Facilitated transport separation of CO₂ and H₂S by supported liquid membrane based on task-specific protic ionic liquids* de Peng *et al.* (2022), foram formuladas membranas de polifluoreto de vinilideno com três diferentes líquidos iônicos próticos suportados e funcionalizados com amina. Ademais, um dos resultados deste estudo foi a estimativa dos valores de permeabilidade de CO₂, H₂S e CH₄ e de seletividade de CO₂/CH₄, H₂S/CO₂ e H₂S/CH₄.

Assim como em tecnologias de adsorção, as zeóliticas podem ser utilizadas para a adsorção de gases e em processos membranosos (ZEN, 2016). Huang *et al.* (2023), no artigo *Large surface-to-volume-ratio and ultrahigh selectivity SSZ-13 membranes on 61-channel monoliths for efficient separation of CO₂/CH₄ mixture*, fabricaram membranas de zeólita (SSZ-13) sob um suporte estrutural monolítico e evidenciaram que a membrana possuía poucos poros defeituosos. Além disso, por apresentar seletividade CO₂/CH₄ de 280, demonstra a potência que esse material possui na separação de gases.

5.1.4.4 Propriedades físico-químicas

Uma série de propriedades físico-químicas foram investigadas nos artigos. Junto com a taxonomia “Impacto/Aplicação”, formam os requisitos necessários para que a inovação tecnológica seja considerada promissora para o adoçamento de GN. As propriedades mais citadas incluíram a permeabilidade (44 dos 86 artigos), seletividade (37), solubilidade (12) e difusividade (7).

A permeabilidade é a propriedade que expressa a taxa de transferência de massa por uma membrana, enquanto a seletividade é a razão da permeabilidade entre dois gases presentes em uma mistura. A Equação 5.1 mostra como é calculado o fluxo do componente i através de uma membrana (TACHY, 2016).

$$J_i = \frac{P_i}{\delta} \times Am \times \Delta P \quad \text{Equação (5.1)}$$

Nesta equação:

J_i = fluxo do componente i através da membrana, em kmol/s;

P_i = permeabilidade do componente i , em kmol.m/(s.m².bar);

δ = espessura da membrana, em m;

A_m = área da membrana, em m²;

ΔP = diferencial entre a pressão do permeado e a pressão do tubo de entrada, em bar.

Portanto, seletividade e permeabilidade são duas propriedades avaliadas para o entendimento do funcionamento de membranas, que devem apresentar adequadamente essas propriedades intrínsecas. A viabilidade econômica de uma membrana é dependente da capacidade de recuperação de um certo componente, área da membrana e vazão de entrada (variáveis que são avaliadas pela seletividade ao gás) e da área da membrana necessária (variável que é avaliada pela permeabilidade) (CERVEIRA, 2016).

O grande número de artigos que avaliaram essas propriedades está de acordo com os resultados observados para as tecnologias de adoçamento de GN baseadas em membranas, que foram reportados em cerca de 61,6% dos documentos selecionados, conforme discutido anteriormente. Portanto, eram esperadas avaliações sobre a permeabilidade e seletividade das membranas. Entender se as membranas terão capacidade de permitir a passagem apenas do que é desejado (GN sem poluentes ou permeado) e reter o indesejável (poluentes ou retentado) é de extrema importância para a eficiência da unidade industrial do adoçamento de GN.

A solubilidade foi também bastante avaliada em artigos que abordaram o método de absorção. Idakwoji, Nzerem e Issa (2023), no artigo *Simulation-based techno-economic assessment of a water-lean solvent for natural gas sweetening technology*, avaliou que, dentre uma série de solventes, a solubilidade de CO₂ foi baixa em uma solução de aminas com cerca de 5% de água, além de 50% MDEA, 30% DIPA, 15% DMSO.

A difusividade é caracterizada por quão rápida é a permeação na membrana, sendo inversamente proporcional ao tamanho da molécula (TOSCANO, 2015). Em sistemas membranosos, é comum a avaliação do modelo solução-difusão, mecanismo de transporte que considera a solubilidade dos componentes de uma mistura gasosa na membrana. Por meio desse modelo, é possível calcular a taxa de permeação de gases ácidos em membranas (MORETTI, 2020). No artigo *Cellulose acetate mixed-matrix membranes doped with high CO₂ zeolitic tetrazolate-imidazolate framework additives*, Li *et al.* (2023) fabricaram uma MMM com matriz acetato de celulose e estruturas zeolíticas tetrazolato-imidazolato (ZTIFs) e foi ressaltada

a importância dos aditivos ZTIFs na alteração dos processos de dissolução e na difusividade do CO₂ nas membranas.

Outras propriedades físico-químicas de destaque avaliadas nos artigos selecionados foram a viscosidade, porosidade e estabilidades estrutural, química e térmica.

A viscosidade, expressa em *centipoise* (cP) no Sistema Internacional, é uma propriedade de extrema importância para a avaliação de solventes utilizados em processos de absorção. O DEA, por exemplo, é uma amina que possui alta viscosidade. Logo, sua mistura na fase aquosa é realizada para melhorar a taxa de transferência de massa e, por conseguinte, o processo de separação e purificação de GN (ELLAFF, 2023). O líquido iônico com ânion heterocíclico aprótico proposto por Atlaskin *et al.* (2021) para a separação de CO₂ e H₂S no artigo *Towards the potential of trihexyltetradecylphosphonium indazolide with aprotic heterocyclic ionic liquid as an efficient absorbent for membrane-assisted gas absorption technique for acid gas removal applications*, teve suas propriedades físico-químicas, entre elas a viscosidade.

A porosidade é utilizada para avaliar sólidos adsorventes e membranas, uma vez que o seu aumento causa melhoria na absorção de gases ácidos. Além disso, a porosidade elevada resulta na diminuição da resistência da transferência de massa, melhorando a recuperação e purificação de GN (CERVEIRA, 2016). Xie *et al.* (2022), no artigo *Highly selective benzimidazole-based polyimide/ionic polyimide membranes for pure-and mixed-gas CO₂/CH₄ separation*, argumentam que a membrana estudada formada por copoliimida é um excelente produto para a separação de gases, devido à ajustabilidade da microporosidade.

As estabilidades estrutural, química e térmica são julgadas para uma série de métodos em termos de se obter vantagens em relação a métodos já utilizados. O material ionomérico de ácido perfluorossulfonado Aquivion® E87-12S, apresentado por Signorini *et al.* (2022) no artigo *Permeation of ternary mixture containing H₂S, CO₂ and CH₄ in Aquivion® perfluorosulfonic acid (PFSA) ionomer membranes*, tem sido estudado devido à estabilidade química e mecânica. Nesse artigo, o Aquivion® E87-12S apresentou estabilidade em ambientes ácidos. DES e líquidos iônicos são solventes que possuem boa estabilidade química e térmica (WEIKERT, 2021).

O Quadro 5.3 sumariza as principais propriedades físico-químicas reportadas nos documentos científicos selecionados.

Quadro 5.3 –Número de artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025 que citam as principais propriedades físico-químicas relacionadas ao adoçamento de gás natural.

Propriedade Físico-Química	Quantidade de artigos em que são citadas
Seletividade	37
Estabilidade	6
Corrosividade	1
Forças intermoleculares	1
Solubilidade	12
Difusividade	7
Permeabilidade	44
Viscosidade	3
Capacidade de absorção	3
Porosidade	5
Durabilidade	2
Calor de absorção	1
Calor de adsorção	2

Fonte: Elaboração própria.

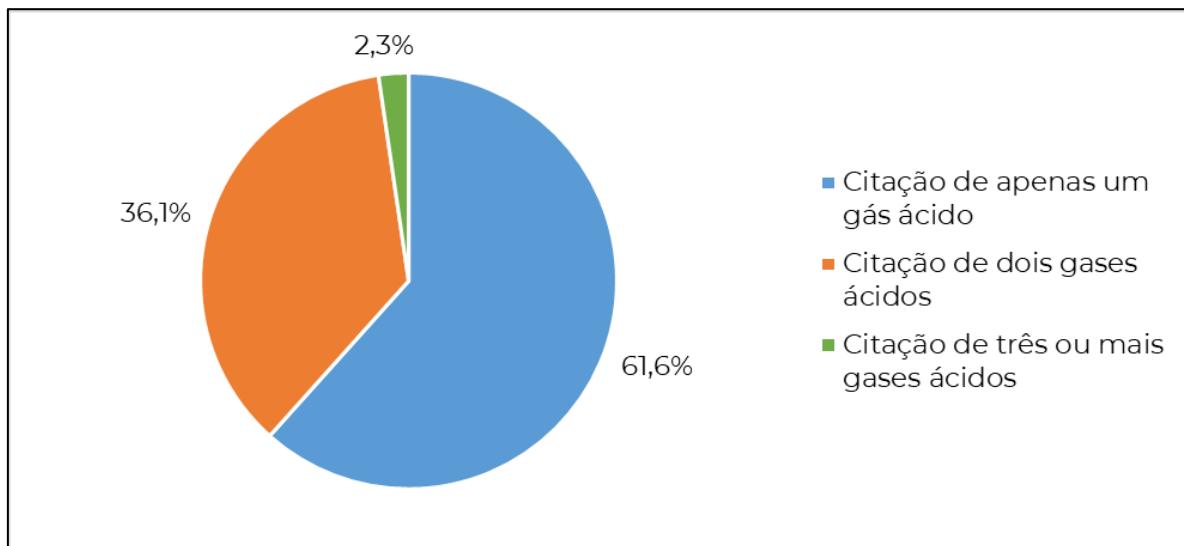
5.1.4.5 Gases ácidos poluentes

Verificou-se que 53 dos 86 artigos selecionados (aproximadamente 61,6%) investigaram a remoção de apenas um gás ácido. Cerca de 36%, abordaram a possibilidade de separação de mais de um gás ácido da corrente de GN, enquanto apenas 2 artigos investigaram a separação de três ou mais tipos de poluentes gasosos, conforme mostra a Figura 5.14.

No artigo *Chitosan-based mixed matrix composite membranes for CO₂/CH₄ mixed gas separation: experimental characterization and performance validation* de Torre-Celeizabal *et al.* (2023), uma membrana de quitosana hibridizada por um líquido iônico 5% em peso e com cargas inorgânicas compatíveis revestida sob um suporte de polietersulfona foi avaliada em termos de eficiência na separação CO₂/CH₄. Um estudo econômico e ambiental feito por Tikadar, Gujarathi e Duria (2020), foi realizado com a separação de CO₂ e H₂S em MMMs de polímeros supervítreos. Nesse artigo (*Multi-objective optimization of industrial gas-sweetening operations using economic and environmental criteria*) são aplicadas modelagem de processos e otimização para aprimorar o desempenho de uma planta operacional de tratamento de gás natural localizada em Lekhwair, Omã. Já Pereira *et al.* (2023), no artigo *Simulation of high-*

pressure sour natural gas adsorption equilibrium on NaX and NaY zeolites using the multicomponent potential theory of adsorption, avaliaram a adsorção de CO₂, H₂S e N₂ em zeólitas faujasitas a alta pressão (4 MPa) e temperatura ambiente (298 K).

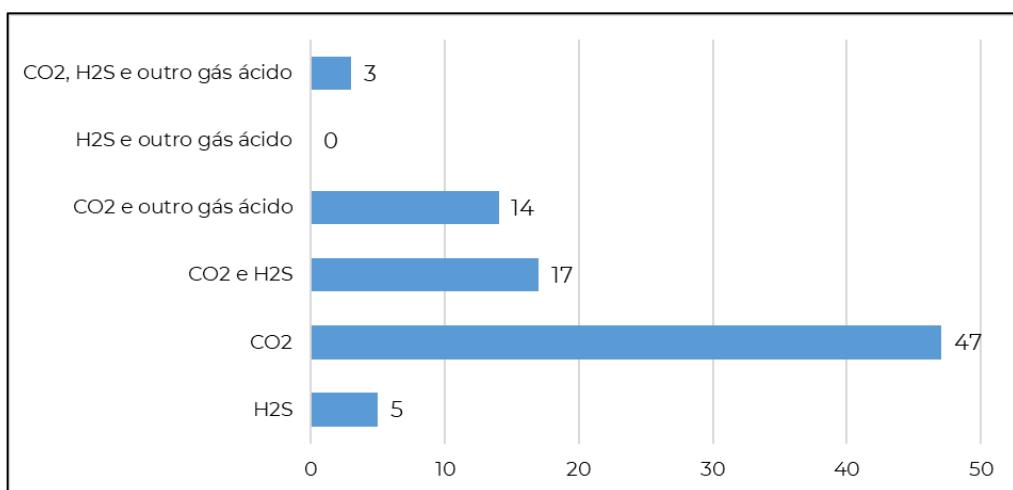
Figura 5.14 – Distribuição dos artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025 em função dos poluentes removidos do gás natural.



Fonte: Elaboração própria.

A maior parte dos artigos (54,6%) avaliaram a remoção de apenas CO₂ do GN, enquanto ~5,81% abordam apenas o H₂S. Cerca de 19,8% investigaram a remoção de H₂S e CO₂, como mostra a Figura 5.15.

Figura 5.15 - Gases poluentes abordados nos artigos selecionados na base *Scopus (Elsevier)* no período 2015-2025.



Fonte: Elaboração própria.

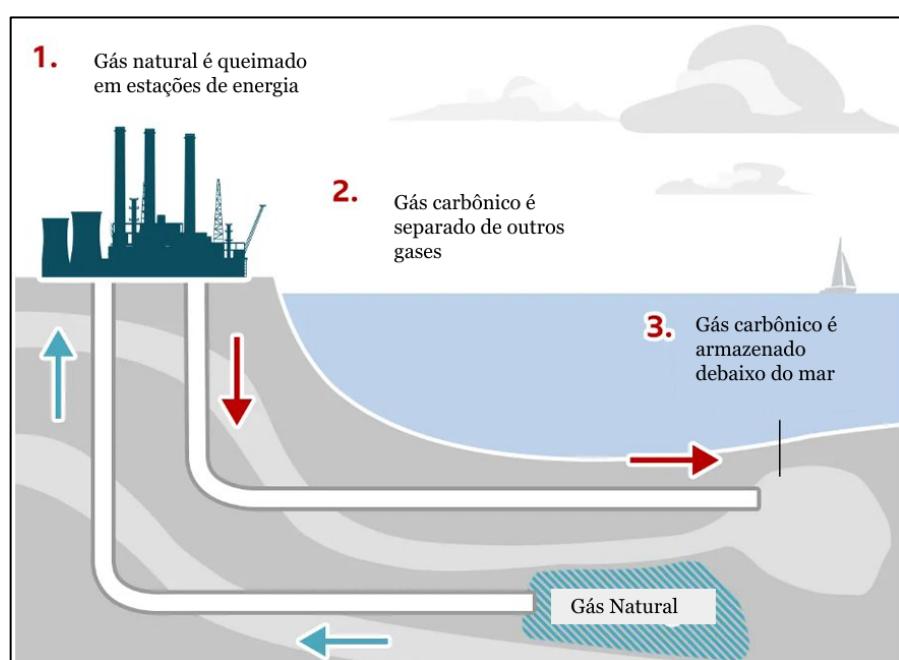
A preferência dos estudos pela remoção de CO₂ pode estar relacionada à sua maior presença no GN, comparado aos outros poluentes gasosos. Além disso, um processo chamado captura e estocagem de carbono desponta como uma tecnologia considerada promissora para a mitigação dos efeitos das mudanças do clima e é recomendada para o desenvolvimento sustentável (HUSSIN, AROUA, 2020, PINTO, FERNEDA, FERRAZ, 2021).

O processo conhecido pela sigla *CCUS* (*carbon capture, utilization and storage*) tem o objetivo de separar o CO₂ e armazená-lo em formações geológicas (PINTO, FERNEDA, FERRAZ, 2021). A tecnologia é utilizada de forma segura desde 1972, com mais de 20 instalações em operação. No Brasil, dez unidades de FPSOs nos campos de Lula, Sapinhoá e Lapa reinjetam CO₂. Em 2017, sete milhões de toneladas de CO₂ foram capturados e reinjetados (LIU, CONSOLI, ZAPANTIS, 2018).

Bui *et al.* (2018) enfatizam a importância de estudos sobre *CCUS* para atingir as metas climáticas que são frequentemente criadas por governos e organizações mundiais. Esse alcance ocorreria porque o *CCUS* poderia ser utilizado para a retirada de carbono de plantas consideradas emissoras-chave de GEEs, como refinarias, produtores de aço, ferro, cimento e petroquímicas. Além disso, a tecnologia está sendo estudada para que se retire o CO₂ da própria atmosfera.

A Figura 5.16 ilustra o processo de *CCUS*.

Figura 5.16 - Esquema do processo de captura e armazenamento de carbono em uma planta de produção de gás natural.



Fonte: Adaptado de FISHER, POYNTING (2023).

O processo *CCUS* tem sido utilizado por algumas empresas, como a *Halliburton*. A companhia estadunidense de mais de um século de história fornece serviços e produtos para o setor de energia. Conforme evidenciado pela própria empresa, há estudos integrados e multidisciplinares para lidar com as incertezas de projetos de captura de armazenamento de carbono, gerenciando os riscos da estocagem nos locais selecionados e modelando e simulando a capacidade de armazenamento (HALLIBURTON, 2025).

Em 2022, foi divulgado um novo projeto entre a *Halliburton* e a empresa *Energean* de exploração e produção independente de óleo no Mediterrâneo e Mar do Norte, para o armazenamento de carbono na bacia de Primos, na Grécia (HALLIBURTON, 2025). Isso mostra que, comercialmente, o mercado está acompanhando os avanços da área.

É sabido que tecnologias usadas para adoçamento de GN também podem ser utilizadas para uma das etapas do processo de *CCUS*. Doze artigos nesta prospecção citam a possibilidade dessa nova forma de mitigar os efeitos das mudanças climáticas pela emissão de GEEs.

5.2 ANÁLISE DAS PATENTES

A Tabela 5.2 apresenta os resultados encontrados na prospecção de patentes realizada. Assim como para os artigos, as patentes foram classificadas como relevantes segundo o seu foco de investigação, que deveria alinhar-se ao objetivo deste estudo

Tabela 5.2 - Resultado da busca estratégica de patentes no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril), usando como critério a seção “página inicial” e analisando a seção “reivindicações”.

Tema	Número de Patentes Encontradas	Número de Patentes Relevantes
“natural gas sweetening” AND (<i>absorption</i> OR <i>adsorption</i> OR <i>cryogenics</i> OR <i>membrane</i>) AND AD:[01.01.2015 TO 29.04.2025]	278	66

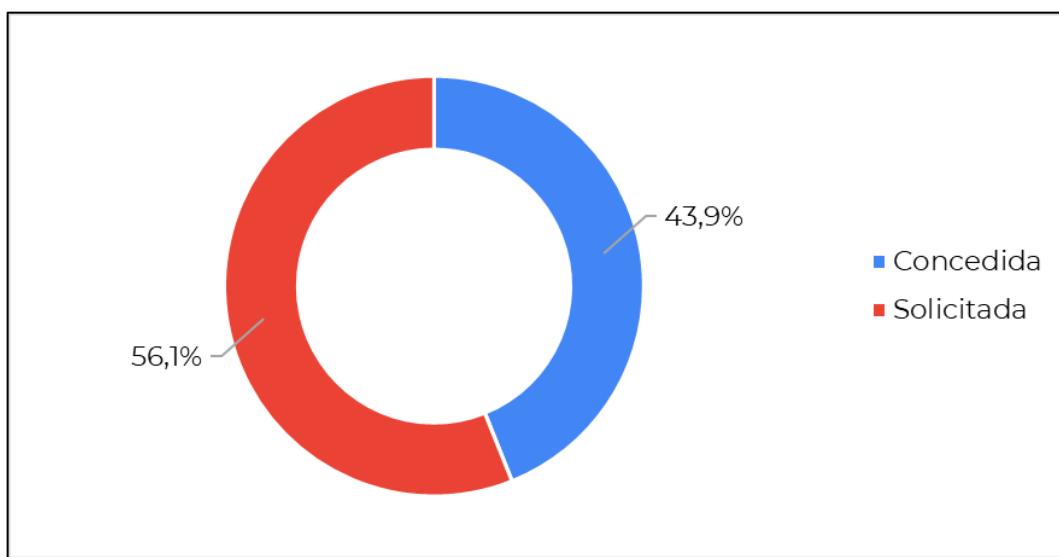
Fonte: Elaboração própria.

5.2.1 Análise Macro

5.2.1.1 Análise da classificação das patentes

A Figura 5.17 ilustra a distribuição entre as patentes selecionadas como solicitadas e concedidas. Do total, 43,9% foram consideradas concedidas, enquanto 56,1% estão em fase para a concessão (sendo, portanto, ainda classificadas como solicitadas).

Figura 5.17 – Distribuição das patentes entre concedidas e solicitadas, selecionadas no Patentscope (WIPO) no período de 2015-2025 (abril).



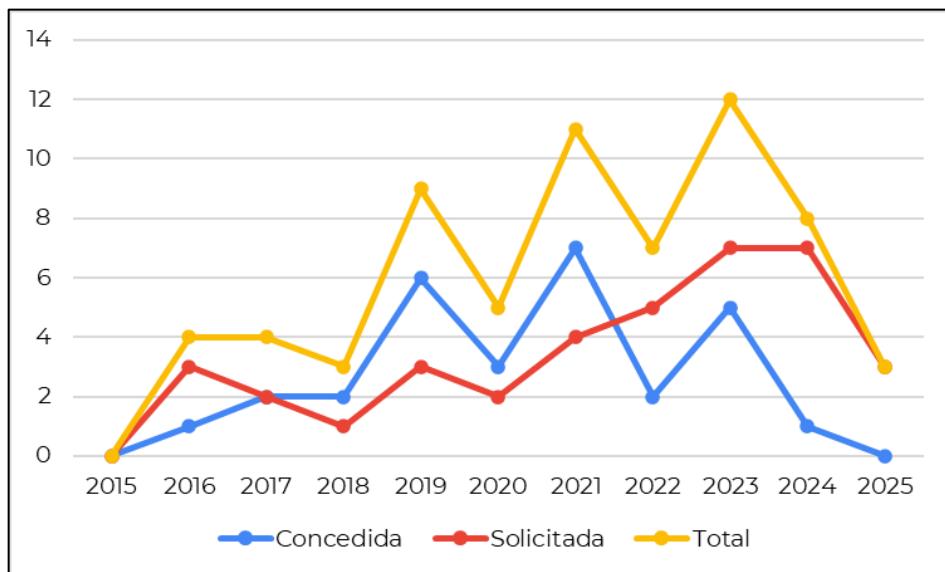
Fonte: Elaboração própria.

O processo de solicitação de patenteamento de uma invenção ou modelo de utilidade se inicia com a avaliação do autor a respeito dos requisitos fundamentais para se ter direito à concessão da patente. É necessário garantir que, de fato, a ideia é nova e possui aplicação industrial ou social. Além disso, é imprescindível que a ideia esteja clara e detalhada e que seja feita uma pesquisa prévia para identificar possíveis invenções iguais à requerida. Em seguida, o(s) requerente(s) pode(m) depositar o pedido de patente em institutos e aguardar o resultado. Quando os pedidos são depositados, as patentes são consideradas como solicitadas e, caso os requisitos sejam atendidos, a patente é concedida. Dessa forma, dá-se o direito de exploração da invenção ou projeto ao solicitante (COUTO, 2024).

5.2.1.2 Análise temporal

A análise temporal das patentes selecionadas, apresentada na Figura 5.18, demonstrou uma tendência de crescimento, apesar de algumas oscilações verificadas no período 2015-2025 (abril). O ano de 2023 apresentou o maior número de documentos, correspondendo a 12 patentes, sendo 7 solicitadas e 5 concedidas. Já no ano de 2015, nenhuma patente foi verificada.

Figura 5.18 – Quantidade de patentes solicitadas, concedidas e totais por ano, selecionadas no Patentscope (WIPO) no período de 2015-2025 (abril).



Fonte: Elaboração própria.

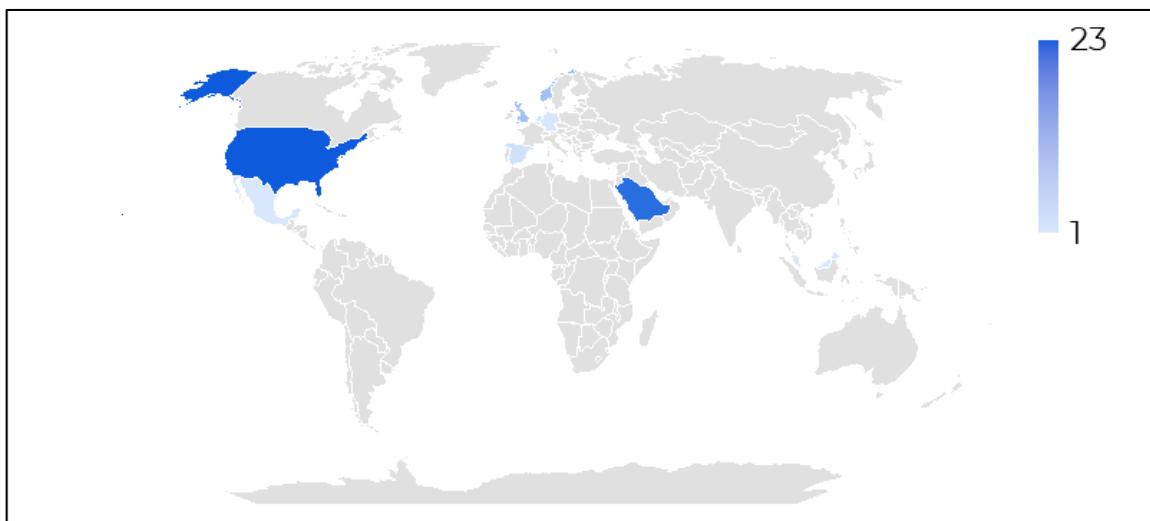
A tendência observada pode ser devida à preocupação com a mitigação dos efeitos climáticos pela ação antropogênicas. Desde o Acordo de Paris em 2015, com o ajustar o molde energético global e discutir novas metas para a redução dos GEEs na atmosfera, algumas disposições foram tomadas. Entre elas, a mútua colaboração para a transferência de tecnologias e a criação de fundos de financiamento (BALDUINO, 2020).

5.2.1.3 Análise geográfica

Acerca dos países de onde as patentes selecionadas surgiram, os EUA lideraram o ranking com 23 patentes concedidas e/ou solicitadas, seguido da Arábia Saudita (21), Reino Unido (7) e Noruega (7), como ilustra a Figura 5.19. Como discutido para os artigos, EUA e Arábia Saudita têm desempenhado papéis importantes na publicação científica, o que está alinhado com o depósito de patentes. Essa relevância tecnológica pode ser atribuída à

potencialidade que o GN tem nesses dois países (PINTO, 2015, SAYED, MASRAHI, 2023, LEMOS, PACHECO, 2017, BARCELOS, 2023).

Figura 5.19 - Escritório de patentes (jurisdição) dos documentos selecionados no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril).



Fonte: Elaboração própria.

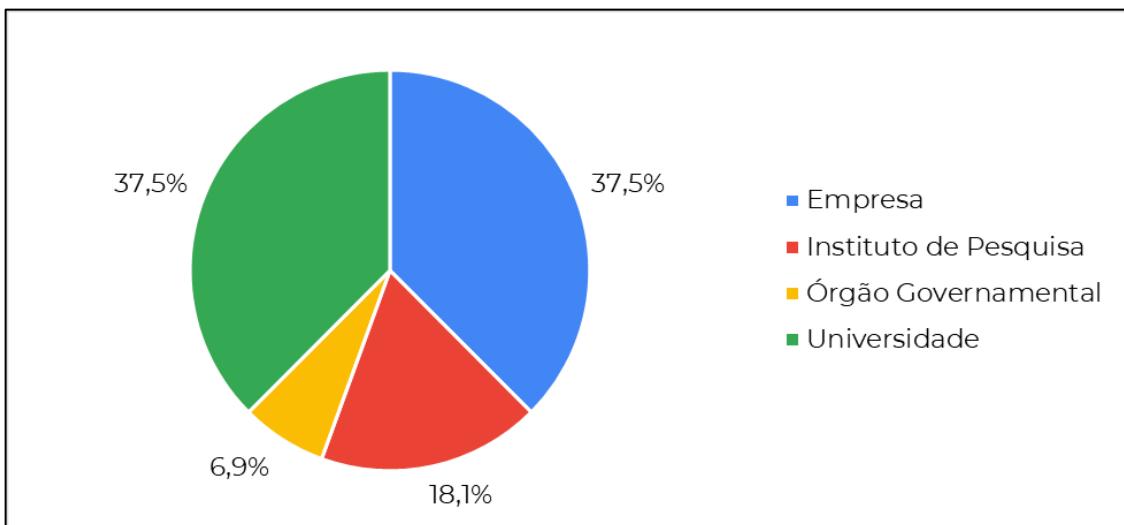
Em relação ao Reino Unido, há interesse na exploração de petróleo e gás de xisto, especialmente após a divulgação de possíveis reservas na Bacia Jurássica de *Weald* e no Vale *Midland* Carbonífero da Escócia, pelo Serviço Geológico Britânico (*BGS*) e pelo Departamento de Energia e Mudança Climática (*DECC*). O gás de xisto é um GN não convencional, que recebe essa denominação devido ao difícil processo de exploração em termos tecnológicos e econômicos, uma vez que não há quantidade economicamente viável nos seus reservatórios, (ARREDONDO, MACHADO, 2019). Apesar disso, o Governo Britânico espera aquecimento da oferta de empregos no país com a exploração dessas reservas, o que deverá contribuir para o seu crescimento econômico (HAYS *et al.*, 2015).

Por fim, a Noruega se destaca na lista de países com mais patentes solicitadas e/ou concedidas, possivelmente em razão da elevada produção e exploração de GN no Ártico. Desde a década de 1920, o Ártico é ponto de exploração de GN e petróleo nas regiões do Alasca, Rússia e Canadá. A partir de 1980, a atenção foi destacada para o Mar de *Beaufort* e Mar de *Barents*, na Noruega, o Mar de *Kara*, na Rússia, e na encosta do Alasca. Adicionalmente, estudos geológicos feitos por órgãos estadunidenses relevaram potencial de exploração desse combustível na região, por, provavelmente, possuir reservas volumosas ainda não descobertas (MORGUNOVA, 2020).

5.2.1.4 Análise acadêmica e empresarial

As patentes selecionadas foram avaliadas em relação aos seus requerentes, que incluíram universidades, órgãos governamentais, empresas e centros de pesquisa, conforme verificado na Figura 5.20.

Figura 5.20 - Distribuição de patentes desenvolvidas por universidades, institutos de pesquisa, órgãos governamentais e empresas, selecionadas no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril).



Fonte: Elaboração própria.

Empatadas, as empresas e as universidades foram os requerentes majoritários com 75% das patentes selecionadas, seguido dos institutos de pesquisa (18,1%). Órgãos governamentais responderam por 6,9% dos documentos analisados.

Doze empresas fizeram depósitos de patentes sobre o tema entre 2015 a 2025 (abril), incluindo a *PETRONAS* (Malásia), *Saudi Aramco* (Arábia Saudita), *Chevron* (EUA), *LEAF-TECH* (Reino Unido), *8 Rivers Capital* (EUA), *Linde* (Alemanha), *C-Capture* (Reino Unido), *Chromis Fiberoptics* (EUA), *Air Products and Chemicals* (EUA), *Carbon Clean Solutions* (Reino Unido) e *CONDALIGN AS* (Noruega). As três primeiras desta lista também foram participantes de pesquisas para publicações de artigos, conforme discutido anteriormente. Destacam-se a *Saudi Aramco*, responsável pela reivindicação de 11 patentes, e a *C-Capture* por 3.

A Universidade de Ciência e Tecnologia Rei Abdullah (*KAUST*) realizou 9 depósitos de patentes, ocupando a primeira posição do *ranking*, seguida da Universidade da Rainha de Belfast (3) e da Universidade Tecnológica de Eindhoven (2). Esse resultado sintetiza a

importância da *KAUST*, uma vez que se encontra na Arábia Saudita, país historicamente importante no cenário de óleo, gás e energia, que apresenta potencialidades a serem desvendadas, como argumenta Pinto (2015). Também salienta-se a importância das universidades na transferência de conhecimento e na apuração de inovações que impactam de forma positiva o mundo.

A Universidade da Rainha de Belfast localiza-se na cidade homônima, capital da Irlanda do Norte, sendo a nona mais antiga do Reino Unido. Fundada em 1845 pela Rainha Vitória, a universidade conta com mais de 50 mil alunos e recebe anualmente estudantes de 120 nacionalidades (*Queen's University Belfast*, 2025). Por sua vez, a Universidade Tecnológica de Eindhoven foi fundada em 1956 pelo governo local, indústria e academia, estando em uma posição chave no ecossistema da inovação da região de Brainport, uma vez que há forte integração entre os estudantes, a indústria e a sociedade. A universidade possui os departamentos de Física Aplicada e Educação em Ciências, Engenharias Mecânica, Química, Biomédica, Elétrica e Industrial, Ciências da Inovação, Matemática e Ciência da Computação, Química e Desenho Industrial, além de quatro institutos de pesquisa (*Eindhoven University of Technology*, 2025).

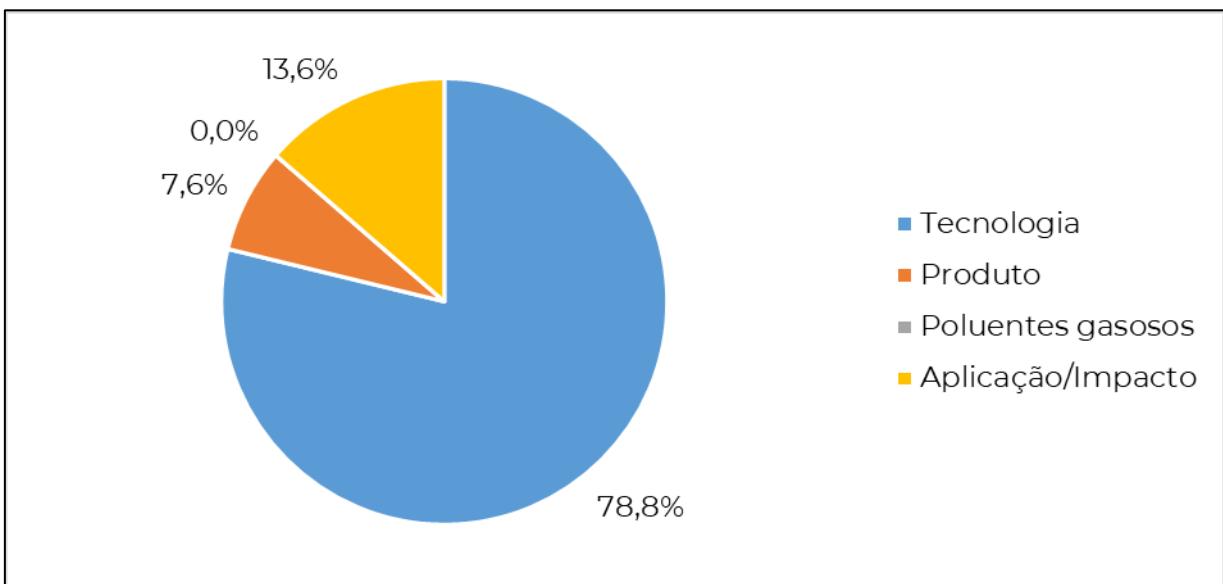
Outra instituição citada uma vez nesta análise foi o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*MIT*). Fundado em 1861, é considerada uma universidade empreendedora. Essa denominação refere-se a instituições com o poder de atender as demandas comerciais por meio de parcerias e pesquisas patrocinadas pelo setor produtivo. Para que a atuação seja garantida, é necessária uma forte integração entre universidade-governo-empresa, também chamada de hélice tripla. No Brasil, os exemplos de universidades empreendedoras são a Universidade Federal de São Carlos e a Universidade de São Paulo (ANDRADE *et al.*, 2024).

Por fim, o Departamento de Energia dos EUA foi um dos órgãos governamentais requerentes das patentes selecionadas. Criado em 1977, tem como um dos seus objetivos a proteção da reserva estratégica de petróleo e a condução de programas que garantam a segurança e a saúde dos trabalhadores expostos aos perigos dessas atividades com combustíveis. Além disso, o Departamento controla 17 laboratórios que prospectam inovações na área de energia há mais de 70 anos (ENERGY, 2025).

5.2.2 Análise Meso

As patentes selecionadas foram agrupadas segundo as mesmas taxonomias Meso propostas para os artigos científicos. A Figura 5.21 apresenta a distribuição das patentes por categoria Meso.

Figura 5.21 – Distribuição dos artigos entre as taxonomias Meso.



Fonte: Elaboração própria.

A maior parte dos artigos teve como foco a taxonomia “Tecnologia”. Este resultado é esperado, tendo em vista que as patentes devem ser solicitadas quando se há algo novo. O foco das patentes foi mostrar novas tecnologias e métodos para o adoçamento de GN.

A taxonomia “Aplicação/Impacto” foi destacada em 13,6% das patentes. Para justificar a concessão de uma patente, é necessário que, além de ser considerado um método novo, a tecnologia deve ter apelo para uso industrial e comercial. Sendo assim, é esperado que esta taxonomia receba ênfase na análise Meso.

Já a taxonomia “Produto” foi salientada em 7,6% das patentes. Alinhado às novas tecnologias, comparar propriedades físico-químicas, como seletividade, permeabilidade, solubilidade, entre métodos novos e antigos foi essencial para defender a escolha e a criação da nova tecnologia.

Assim como nos artigos, o foco não foi concentrado na taxonomia “Gases Poluentes”. Isso é devido à convergência de técnicas de adoçamento de gás e captura de CO₂. Somado à relativa baixa presença de outros tipos de gases ácidos nas correntes gasosas, não houve patentes que abordassem como destaque a remoção de outros gases poluentes, como o COS.

5.2.3 Análise Micro

Similarmente à Análise Micro dos artigos, as patentes selecionadas foram classificadas segundo dois níveis de detalhamento (Micro I e Micro II), usados para explicar as taxonomias Meso.

O Quadro 5.4 apresenta as taxonomias representativas das patentes depositadas e concedidas analisadas neste estudo.

Quadro 5.4 - Análise Micro das patentes selecionadas no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril).

Meso	Micro I	Micro II
Tecnologia	Absorção	Líquido iônico
		Solvente único
		Solvente híbrido
	Membranas	Membrana de Matriz Mista (MMM)
		Polímeros
		Fibra oca
		Líquido Iônico + Membrana
		Zeólicas
		Membrana de Carbono
		Polímero com CO ₂ -filicos
		MOF + Polímero
	Adsorção	Estruturas Metalorgânicas (MOF)
		Dispersão de zeólita
		Sorvente peletizado
	Criogenia	--
Produto	Propriedades Físico-Químicas	Seletividade
		Estabilidade
		Corrosividade
		Solubilidade
		Difusividade
		Permeabilidade
		Viscosidade
		Capacidade de absorção
		Porosidade
		Durabilidade
		Capacidade de adsorção
		Pressão de vapor
		Volatilidade
		Hidrofobicidade
		Densidade
		Resistência química / mecânica
		CO ₂
Poluentes gasosos	Gases ácidos	H ₂ S
		Outros
Aplicação / Impacto	Economia de Energia	--
	Econômica	--
	Escalabilidade	--
	Saúde e Segurança	--
	Operação / Otimização	--
	Eficiência Energética	--
	Ambiental	--
	Instalações	--

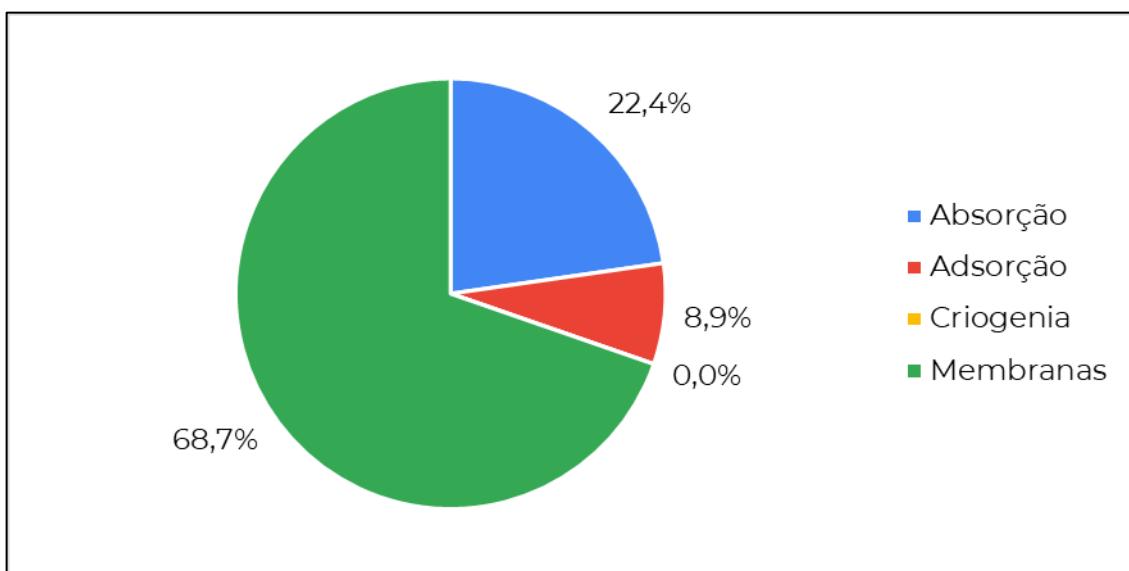
Fonte: Elaboração própria.

5.2.3.1 Análise Micro I

Tecnologia

Assim como explicitado na busca estratégica para patentes, foram definidas quatro tecnologias: absorção, adsorção, criogenia e membranas. A Figura 5.22 indica a distribuição das patentes entre cada uma dessas tecnologias.

Figura 5.22 – Distribuição das patentes selecionadas no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril) em função dos principais métodos de adoçamento de gás natural.



Fonte: Elaboração própria.

Assim como na análise dos artigos, a maior parte das patentes referiram-se aos processos membranosos, em cerca de 68,7% dos documentos analisados. Em seguida, aproximadamente 22,4% discorreram sobre a absorção, 8,9% sobre a adsorção e nenhuma sobre criogenia. De fato, os processos criogênicos são considerados demasiadamente caros e pouco viáveis comercialmente. Assim, era esperado um baixo número de patentes reportando aplicações industriais dessa abordagem para o adoçamento de GN.

Weikert (2021) apresenta as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos investigados neste estudo, que foram sumarizadas no Quadro 5.5. Essas informações corroboram para a dificuldade de se implementar industrialmente a tecnologia de criogenia, especificamente para processos de remoção de poluentes ácidos do GN. Observa-se que, para o caso da criogenia, sua aplicação comercial só se justifica em GN contendo altas concentrações de CO₂ (acima de 20%) o que não corresponde à realidade brasileira, uma vez que os reservatórios do país não apresentam grandes quantidades de CO₂.

Quadro 5.5 - Vantagens e desvantagens dos métodos de absorção, adsorção, membranas e criogenia.

Método	Vantagens	Desvantagens
Absorção	<ul style="list-style-type: none"> -Vantajoso e econômico para processos com altas vazões de gás; -Alta capacidade de remoção de gases ácidos; -Baixa perda de CH₄; -Operável em altas temperaturas e pressões; -Fácil operação; -Alta flexibilidade do processo; -Solventes com baixo custo; -Grande área de contato devido aos solventes líquidos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Grande volume de equipamentos necessário; -Grande consumo energético para a regeneração de aminas; -Possível corrosão dos equipamentos devido às aminas; -Problemas de inundação, espuma e canalização.
Adsorção	<ul style="list-style-type: none"> -Economicamente viável; -Baixo consumo energético para recuperação dos adsorventes; -Boa capacidade de reutilização do adsorvente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Necessidade de pré-tratamento do gás para evitar a redução da área superficial do adsorvente por impurezas; -Perda significativa de CH₄; -Ocupação dos sítios dos adsorventes por outros gases presentes; -Redução da capacidade de remoção dos adsorventes em altas temperaturas.
Membranas	<ul style="list-style-type: none"> -Fácil operação e manutenção; -Equipamentos reduzidos; -Energeticamente viável; -Grande área de contato. 	<ul style="list-style-type: none"> -Operação a partir de 15 bar; -Possibilidade da deposição de partículas na superfície da membrana; -Baixa viabilidade para processos com altas vazões de gás; -Perda significativa de CH₄; -Degradação das membranas em altas temperaturas.
Criogenia	<ul style="list-style-type: none"> -Alta capacidade de remoção em altas concentrações; -Uso de agentes químicos de baixo custo; -Ausência de corrosão. 	<ul style="list-style-type: none"> -Operação viável a partir de 20% (v/v) de concentração de CO₂; -Economicamente inviável devido à altos valores de investimento e operação; -Grande consumo energético.

Fonte: WEIKERT (2021).

Produto

As propriedades físico-químicas avaliadas pelos pesquisadores das patentes foram agrupadas na taxonomia “Produto”. Sandru, Sandru e Stenstad (2021), na patente *Hybrid polymer membrane* de número US20210229031, desenvolveram uma membrana com uma camada porosa e permeável ao GN. Além disso, há uma camada de polímero seletiva formada por enzimas anidrase carbônica. Uma das etapas da pesquisa foi a realização de um teste de durabilidade da membrana, expondo-a durante 350 horas às seguintes condições: 5% de CO₂, 85% de N₂, 10% de O₂, 300 ppm de SO₂; pressão de 1,2 bar, temperatura de 25 °C e gases úmidos. Já na patente *Blends of thermally degraded amines for CO₂ capture*, de número WO2017165339, solicitada por Rochelle, Du e Yuan (2017), uma das premissas para o

desenvolvimento de um solvente de amina é a baixa volatilidade, uma característica considerada ideal.

Poluentes gasosos

Em concordância com a análise de patentes, foi avaliado quais gases ácidos poderiam ser removidos ao implantar o método proposto nas patentes. A permeânci a e a seletividade do CO₂ em uma membrana inchada em água e com enzimas miméticas adicionais foi o objeto de pesquisa na patente *Composite membrane* (WO2016162518), de Deng e Saeed (2016). Já Yi *et al.* (2019b), na patente de número WO2019006045, denominada *Compositions and methods for membrane separation of acid gas from hydrocarbon gas*, propuseram uma membrana formada por polímero de microporosidade intrínseca funcionalizado com amidoxima e investigaram a separação apenas do H₂S por ela.

Impacto/Aplicação

Quanto ao impacto gerado, a análise retornou os valores expostos no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Impactos avaliados nas patentes selecionadas no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril).

Impacto/Aplicação	Quantidade de patentes em que são citados
Economia de Energia	6
Operação/Otimização	6
Instalações	2
Escalabilidade	2
Ambiental	4
Saúde e Segurança	1
Econômica	8
Eficiência Energética	62

Fonte: Elaboração própria.

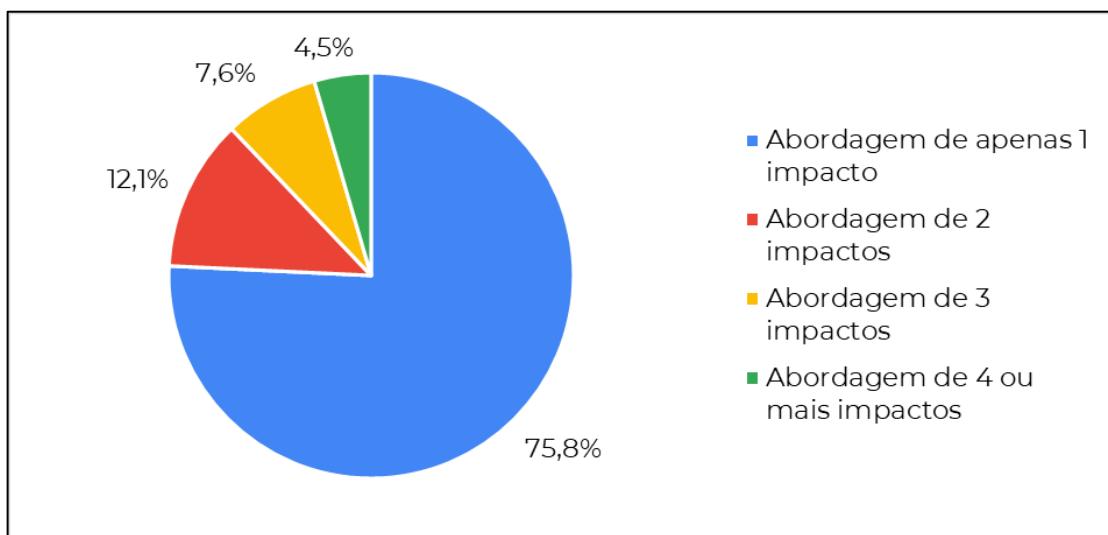
Assim como nos artigos, os requerentes possuíram maior preocupação em inventivos que potencializassem a separação do GN. Além disso, foi possível observar alguns impactos diferentes dos apresentados na análise de artigos, principalmente instalações e meio ambiente.

O impacto sobre as instalações correspondeu a vantagens que determinada invenção promoveu aos sistemas produtivos, incluindo equipamentos, instrumentos, tubulações e espaço físico. Na patente *Aromatic co-polyimide gas separation membranes derived from 6FDA-6FPDA-type homo-polyimides*, solicitada à Organização Mundial de Propriedade Intelectual

sob o número 2020176585, a implementação de uma membrana de poliimida aromática foi considerada positiva por necessitar de um espaço menor que as utilizadas atualmente (YAHAYA *et al.* 2020). Thompson e Culp (2023) garantiram na patente depositada *Beta-amino carboxylate (BAC) solvents for enhanced CO₂ separations*, sob número US20230321591, que o uso do solvente de beta-amino carboxilato (BAC) foi vantajoso por causar menor impacto ambiental comparado aos solventes físicos disponíveis no mercado.

Um pouco mais de 75% das patentes selecionadas reportaram apenas um impacto a partir do uso das tecnologias investigadas para o adoçamento de GN. Em seguida, 11,9, 9 e 4,5% abordaram dois, três e quatro ou mais impactos, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 5.23.

Figura 5.23 - Tipos de impacto abordados nas patentes selecionadas no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril).



Fonte: Elaboração própria.

MOFs foram estudadas por Qazvini e Telfer (2020), na patente *Metal-organic frameworks for gas adsorption* (CA3123380). Os autores focaram na eficiência na separação e indicaram a excelente aplicabilidade deste composto, já que foi responsável pela remoção completa de CO₂. Membranas de poli-imidas incorporadas com grupo hidroxila (OH-) foram desenvolvidas por Hayek e Alsamah (2024b), na patente *Hydroxyl-functionalized cardo-based polyimide membranes* (US20240150519). Além da melhora na separação, os pesquisadores relatam a possibilidade da diminuição das despesas de capitais (CAPEX) e despesas operacionais (OPEX), uma vez que esta membrana se mostra resistente à alta temperatura e alta pressão.

Liu, Yang e Vaidya (2024), na patente de número US20240198282, intitulada *Tunable H₂S and CO₂ condensability membranes for H₂S and CO₂ removal from sour natural gas*, desenvolveram uma membrana polimérica que combina alta seletividade e alta permeabilidade e que pode ajudar na redução do consumo de energia em comparação ao adoçamento feito com aminas. Além disso, a membrana pode performar em meios com pressão de 200-800 psig. Uma membrana feita a base de derivados de arroz foi criada por Mohamad *et al.* (2022), na patente *Method for capturing CO₂ from effluent gases using a rice-derived product* (US11311835). Além da disposição de resíduos alimentares para outro fim e da melhora na separação de poluentes do gás, esse método promete diminuir os custos e o gasto energético associados à remoção de CO₂ e ser ambientalmente amigável.

5.2.4 Análise Micro II

5.2.4.1 Tecnologias de Absorção

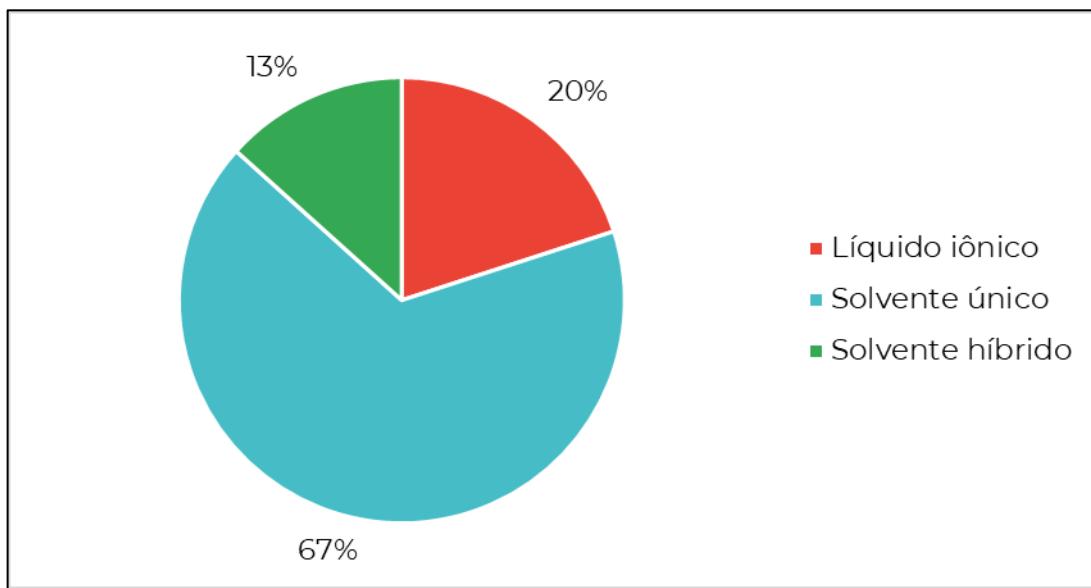
Ao se avaliar o nível Micro II, os principais métodos de absorção reportados nas patentes selecionadas foram o líquido iônico, solvente químico, solvente físico e solvente híbrido. A distribuição das patentes em relação a essas tecnologias está apresentada na Figura 5.24.

Deng e Li (2016), na patente *Process for separating a gas from a gaseous mixture by a liquid absorbent comprising a polyethylene glycol and an ionic liquid*, sob o número EP3047895, desenvolveram um líquido iônico com o polietilenoglicol para a remoção de CO₂, H₂S e NH₃. O processo é formado por duas fases: a de absorção e a de desabsorção. Na primeira fase, a pressão pode variar de 20-80 bar e a temperatura não deve exceder, preferencialmente, a temperatura de 60 °C. Já na segunda fase, a pressão deve ser mais baixa (3 bar) e a temperatura não deve ultrapassar os 140 °C.

Solventes à base de siloxano dissustituído com polietilenoglicol foram a escolha da pesquisa de Hopkinson *et al.* (2019), na patente de número US20190358585 (*Di-substituted siloxane solvents for gas capture*). Este solvente foi estudado para a remoção de CO₂ da corrente gasosa nas temperaturas de 25 °C e 40 °C, com a pressão de CO₂ variando entre 0 a 20 bar.

Na patente concedida a Allam e Rafati (2024), *Separation of sulfurous materials* (US12116543), um solvente podendo conter mais de um componente foi estudado para a remoção de materiais sulfurosos, podendo ser H₂S e COS, por exemplo, de uma corrente gasosa mista.

Figura 5.24 – Distribuição das patentes selecionadas no Patentscope (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) em função dos métodos de absorção.



Fonte: Elaboração própria.

5.2.4.2 Tecnologias de Adsorção

Em relação à adsorção, três métodos foram identificados nas patentes selecionadas, conforme verificado na Figura 5.25, sendo: sorvente peletizado, dispersão de zeólita e estrutura metalorgânica (MOF).

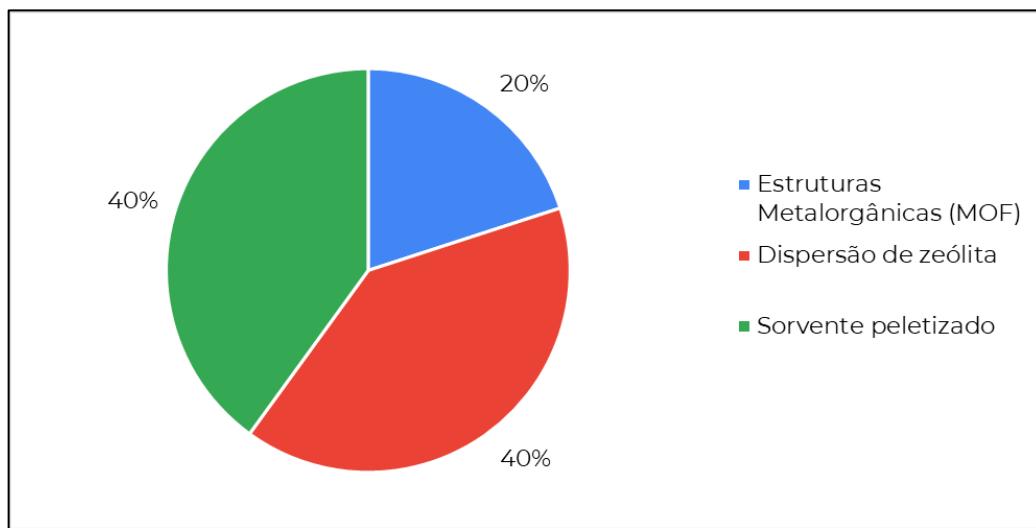
O sorvente peletizado é uma aglomeração de materiais constituintes, que contém partículas de sorvente de amina imobilizada básica (*BIAS*). Além disso, é possível que haja outros compostos, como dispersantes e surfactantes não iônicos. A separação em um sorvente peletizado ocorre em algumas etapas, em que o gás poluente é, inicialmente, encaminhado à superfície do *pallet* por difusão, seguida de sua penetração pelos poros das partículas *BIAS* e, finalizando com a reação entre o gás poluente e o grupo amina do *BIAS*. Este estudo foi feito por Wilfong *et al.* (2020), na patente de número WO2020055527, denominada *A pelletized immobilized amine sorbent for CO₂ capture*.

A dispersão de zeólita é uma mistura entre um líquido e um material sólido poroso. O líquido é chamado de líquido de exclusão de tamanho, devido ao tamanho de suas partículas ser superior ao dos poros das zeóliticas. Logo, não há risco de entupimento e consequente diminuição da eficiência de separação, como mostrado na patente *Method of adsorbing a gas into a liquid*, de número EP3790646, elaborada por James, Tsang e Cahir (2021).

Como apresentado previamente no capítulo 5.1.4.2, as MOFs são atrativas no cenário de adsorção de gás motivadas por série de fatores. Destacam-se a alta porosidade, grande área

superficial, ajustabilidade de características físicas e químicas e forte interação entre moléculas e seletividade (AHMADIJOKANI *et al.*, 2020). A patente intitulada WO2024123249 (*Methods for adsorbing carbon dioxide*), de Zhang *et al.* (2024), MOFs de estrutura ultramicroporosa (poros menores que 7 Å) foram utilizadas para a remoção de CO₂.

Figura 5.25 – Distribuição das patentes selecionadas no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril) em função dos métodos de adsorção.



Fonte: Elaboração própria.

5.2.4.3 Tecnologias de Membranas

A Figura 5.26 apresenta a distribuição dos principais métodos de adoçamento de GN baseados em membranas, reivindicados nas patentes selecionadas. Alguns desses métodos foram discutidos previamente no Capítulo 5.1.4.3.

De acordo com a Figura 5.26, nota-se o predomínio de membranas poliméricas, sendo abordada por 60,9% das patentes relevantes. Esse valor é devido ao potencial que essas membranas possuem de aumentar a eficiência, ao passo que necessitam de um espaço compacto e são menos custosas que os métodos tradicionais. Elas são capazes de separar seletivamente os componentes de uma mistura com base na afinidade (HAYEK, ALSAMAH, 2024a). Na patente de número US20240218127, denominada *Crown ether-containing polymers* e elaborada por Yang e Li (2024), uma membrana formada por polímero com unidades monoméricas de éter coroa foi desenvolvida como opção para a separação de CO₂.

Em seguida, 13% das patentes selecionaram reivindicaram a tecnologia de membranas poliméricas incorporadas por compostos reticuladores CO₂-filicos, que foram usadas para

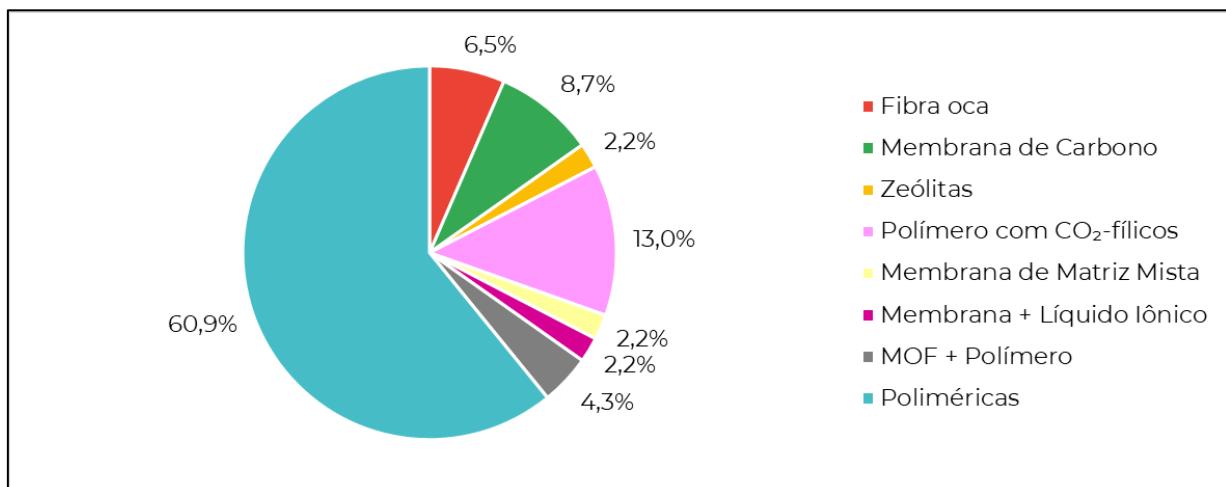
potencializar a interação da membrana com o gás carbônico. Sundell *et al.* (2022), na patente *CO₂-philic crosslinked polyethylene glycol-based membranes for acid and sour gas separations* (WO2022147579), utilizou membranas de polietilenoglicol e, para a preparação da membrana com esses compostos CO₂-fílicos, um derivado de melanina funcionalizado foi reagido com o PEG. O resultado é uma melhora na interação entre alguns componentes do gás com esta membrana, uma vez que ocorre certa dependência da conformação e orientação específica para esta interação ocorrer.

Por fim, 8,7% das patentes reportaram a tecnologia de membrana de carbono. As membranas de carbono são preparadas por meio da pirólise em ambientes não oxidativos de membranas poliméricas fabricadas a partir de alguns precursores, como as resinas fenólicas, poliacrilonitrila, poli(éter imida) e poliimidas. A variedade de membranas de carbono é resultado da série de membranas poliméricas existentes, somada à extensa lista de precursores que podem ser utilizados na sua fabricação. Além disso, a mudança das condições da pirólise e do pós-tratamento podem ser determinantes para a qualidade das membranas de carbono (HAMM, 2018).

A separação gasosa em membranas de carbono pode ser feita por meio de peneira molecular e por difusão por absorção. A primeira refere-se à passagem do gás com partículas menores que os poros, enquanto a segunda corresponde à interação entre o gás de interesse com os poros da membrana de carbono (RAHIMALIMAMAGHANI *et al.*, 2025). Dentre as vantagens da membrana de carbono, pode-se citar a estabilidade térmica a altas temperaturas e a resistência à plastificação. Este parâmetro, inclusive, é de extrema importância no entendimento de membranas. A plastificação ocorre quando há dissolução de penetrantes na matriz polimérica, geralmente em alta pressão. Esse fenômeno causa o inchamento das membranas, reduzindo uma das principais vantagens das membranas: a seletividade. O CO₂ é um dos gases que podem causar esse inchamento; portanto, para sistemas de adoçamento de gás, é imprescindível a avaliação da resistência à plastificação (CERVEIRA, 2016).

Na patente *A process for the preparation of a supported carbon membranes (CMS)*, de número US20250059043, de Rahimalimamaghani *et al.* (2025), uma membrana de carbono foi utilizada como um reator de membrana. O objetivo desta patente é aumentar a seletividade e a permeabilidade da membrana para que ela seja aplicada em processos industriais.

Figura 5.26 – Distribuição das patentes selecionadas no Patentscope (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) em função dos métodos de separação por membranas.



Fonte: Elaboração própria.

5.2.4.4 Propriedades físico-químicas

As propriedades físico-químicas analisadas na etapa Micro I foram 16 ao todo, conforme verificado no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 - Número de patentes selecionadas no Patentscope (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) que abordaram propriedades físico-químicas relacionadas ao adoçamento de gás natural.

Propriedade Físico-Química	Quantidade de patentes em que são citadas
Seletividade	43
Solubilidade	10
Porosidade	3
Permeabilidade	35
Durabilidade	1
Densidade	1
Corrosividade	1
Capacidade de absorção	5
Porosidade	4
Pressão de vapor	1
Volatilidade	1
Hidrofobicidade	1
Viscosidade	6
Resistência química e mecânica	3
Difusividade	2
Estabilidade	10

Fonte: Elaboração própria.

Novamente, se destacam a seletividade e permeabilidade como as propriedades mais citadas dos documentos prospectados neste estudo, devido à sua relação com a eficiência de uma membrana, método mais reivindicado nas patentes selecionadas.

Uma membrana híbrida formada por um polímero e uma MOF foi desenvolvida por Liu e Yang (2023) e registrada na patente *Hybrid membranes with functionalized fillers for natural gas sweetening*, de número US11834619. Estudos mostram que a seletividade de H₂S/CH₄ aumentou de 20% para 50% a pressão de 200 psig, quando comparada ao polímero sem a MOF. Quando se compara a membrana formada por blocos de homopolímeros funcionalizados com os grupos hidroxila (OH-) e carboxila (COOH-) para misturas de poliimida criada por Pinna *et al.* (2020), na patente intitulada US20200095423 (*Polyimide blends, methods of making each and methods of use*), a seletividade mostra-se melhor em relação às membranas utilizadas comercialmente.

A permeabilidade foi uma das propriedades físicas estudadas por Ma, Ghanem e Pinna (2019) na patente *O-hydroxy-functionalized diamines, polyimides, methods of making each, and methods of use* (EP3169661), obtendo o valor de 2,4 bar para o CO₂ e 3,8 bar para o N₂. Esta propriedade também foi avaliada por Deng *et al.* (2018). A permeabilidade do CO₂ pode ser cem vezes maior que a permeabilidade de outros gases da mistura de GN na membrana preparada e registrada na patente *Membrane contactor comprising a composite membrane of a porous layer and a non-porous selective polymer layer for CO₂ separation from a mixed gaseous feed stream*, sob o número US20180264399.

Na sequência, solubilidade e estabilidade foram reportadas em 10 documentos, sendo a primeira utilizada para a avaliação de invenções que tratavam de membranas e processos de absorção e adsorção, enquanto a segunda foi avaliada especificamente para absorção e membranas.

Na patente de James, Tsang e Cahir (2021), a respeito de uma dispersão contendo partículas porosas de zeólitas, a solubilidade de CO₂ e CH₄ foram estudadas em soluções de zeólitas a 12,5 e 25% (p/p). Barnes *et al.* (2023) reivindicaram na patente US20230249127, nomeada *Rate enhancement of gas capture processes*, o uso de dois líquidos para a absorção de CO₂. Com isso, a solubilidade desse gás foi assistida. Por fim, Dusselier *et al.* (2023), na patente *Gas separation membranes* de número WO2023209112A1, calcularam o valor da solubilidade de CO₂ em uma membrana de matriz mista preparada com Na-SSZ-39.

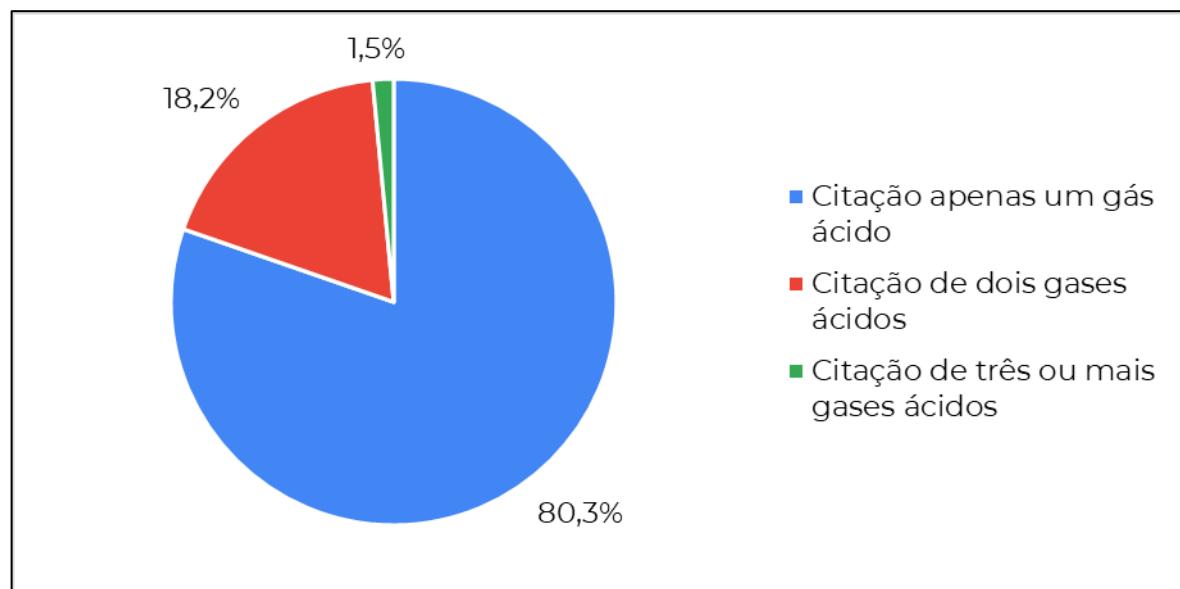
Na patente *Thermally crosslinked polytriazole separation membranes*, de número US20240390865, solicitada por Chisca *et al.* (2024), a despeito de membranas de politriazol termicamente reticuladas, foi enfatizado que a estabilidade da membrana em diversos solventes,

ácidos e bases concentrados é uma ativo para a sua aplicação em diversos sistemas químicos. A estabilidade térmica da membrana foi avaliada por meio de uma análise termogravimétrica (TGA). Bumb (2021), em sua patente intitulada US20210236984 (*Carbon capture solvents having alcohols and amines and methods for using such solvents*) sobre solventes químicos contendo álcoois e aminas, determinou que uma das vantagens desses compostos é a sua estabilidade química, tornando-os não vulneráveis à degradação oxidativa.

5.2.4.5 Gases ácidos poluentes

Para os gases ácidos, assim como nos artigos, houve a predominância de patentes que abordaram a separação de apenas um poluente na corrente de GN, correspondente a mais de 80%. Quando se trata de dois gases ácidos citados, este valor é de 18,2%. Por fim, apenas 1,5% das patentes fazem referências a pelo menos três gases ácidos. A Figura 5.27 apresenta essa análise em relação à quantidade de gases que cada patente abordou.

Figura 5.27 – Distribuição das patentes selecionadas no Patentscope (WIPO) no período de 2015-2025 (abril) em função dos poluentes presentes no gás.



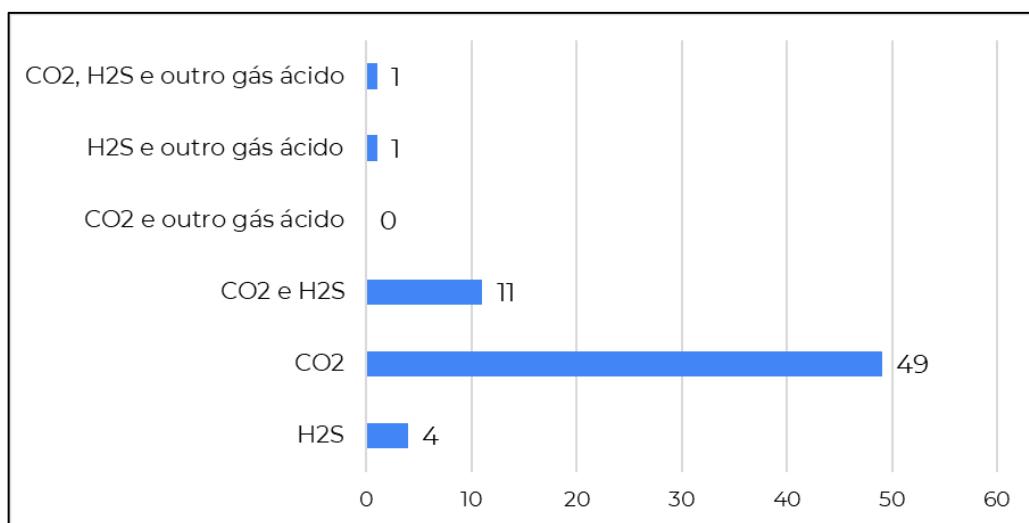
Fonte: Elaboração própria.

Um absorvente líquido à base de silício foi utilizado para a remoção de apenas um gás ácido, o CO₂, na patente de Perry *et al.* (2016) chamada *Liquid carbon dioxide absorbents, methods of using the same, and related systems* (US9956520). Já na patente desenvolvida por Bhuwania e Chinn (2023), denominada *Membrane-based natural gas sweetening under humid conditions*, de número WO2023220203, uma membrana foi estudada para a remoção de H₂S e

CO_2 , apresentando seletividade relativa ao CH_4 de 10 e 5, respectivamente. Han, Ho e Hu (2024), na patente intitulada WO2024059033 (*Polyguanidine-containing membranes and methods of using thereof*), produziram uma membrana contendo poliguanidina capaz de remover gases, como CO_2 , H_2S , SO_2 , NO_x .

Especificando os gases ácidos poluentes, foi possível identificar o CO_2 como o principal componente removido do GN no processo de sua purificação, como verificado na Figura 5.28.

Figura 5.28 – Gases poluentes abordados nas patentes selecionadas no *Patentscope (WIPO)* no período de 2015-2025 (abril).



Fonte: Elaboração própria.

Para exemplificar essa informação, duas patentes abordaram métodos e focaram apenas na remoção do CO_2 . A primeira é intitulada *Ultra-thin, pinhole-free, flexible metal-organic films*, US20170158809, de Gleason *et al.* (2017). Nela, uma rede covalente metal-orgânica suportada em uma membrana foi utilizada para a separação de CO_2/CH_4 , apresentando seletividade de 100 e permeabilidade de CO_2 de 20 bar. Na patente denominada *High-performance ladder polymers for membrane gas separation*, sob o número US20220411574, de Lai *et al.* (2022), apenas o gás ácido CO_2 foi estudado em termos de seletividade e permeabilidade.

5.3 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS ENCONTRADOS

O Quadro 5.8 sumariza os principais resultados encontrados na prospecção técnico-científica realizada neste estudo, considerando as Análises Macro, Meso, Micro I e II de artigos e patentes.

Quadro 5.8 - Resultados do estudo prospectivo.

Aspecto	Tendências em Artigos	Tendências em Patentes
Ano de maior destaque	2021.	2023.
Países relevantes nas pesquisas	China.	EUA.
Análise acadêmica e empresarial	Universidades, em especial a Universidade de Ciência e Tecnologia Rei Abdullah.	Empresas e universidades empatadas em primeiro lugar.
Foco dos Documentos	Aplicação/Impacto.	Tecnologias.
Tecnologia	Membranas poliméricas.	Membrana poliméricas.
Propriedade Físico-Química Analisada	Permeabilidade, seguida da seletividade e da solubilidade.	Seletividade, seguida da permeabilidade, da solubilidade e da estabilidade.
Gases Poluentes	Gás Carbônico.	Gás Carbônico.
Aplicação	Eficiência na separação.	Eficiência na separação.

Fonte: Elaboração própria.

6 CONCLUSÃO

A prospecção tecnológica é uma ferramenta eficaz para entender a maturação de soluções para desafios enfrentados pela sociedade no presente ou que poderão ocorrer no futuro. Por meio da metodologia adotada neste estudo, foi possível avaliar a realidade dos métodos de adoção de GN e como esse processo poderá se comportar nos próximos anos.

Primeiramente, foi exposta a importância de se ter pesquisas e estudos sobre os diversos processos que ocorrem com o GN. A demanda energética existe e cresce a cada ano. Além disso, grandes potências mundiais como a China e os EUA possuem o GN como um dos principais combustíveis ou têm interesse em investir para que alcance um melhor posicionamento em suas matrizes energéticas. Somado a isso, o consumo de GN tem aumentado e ainda há um enorme volume de gás presente em reservas provadas não exploradas. Logo, o desenvolvimento de processos seguros e eficientes em toda a cadeia produtiva do GN é fundamental para o futuro desse combustível.

Posteriormente, a necessidade da transição energética para uma economia de baixo carbono vem traçando metas que governos fazem em conferências, como a COP-21. Nesse sentido, muitos países têm buscado substituir o carvão e o petróleo por combustíveis de menor emissão de GEE. Além das fontes renováveis de energia, o GN, mesmo sendo um combustível fóssil, emite menos GEEs que o carvão e o petróleo, fontes ainda utilizadas em larga escala.

Em particular, a busca estratégica de artigos e patentes gerou um expressivo número de publicações no período 2015-2025 (abril/maio) para análise. Foi observado que as universidades representam um importante meio de criação e transferência de conhecimento, uma vez que são responsáveis por um grande número de publicações científicas e técnicas. Nesse contexto, o estreitamento da relação universidade-empresa é fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias de adoção de GN.

As principais universidades e institutos de pesquisas foram a Universidade de Ciência e Tecnologia Rei Abdullah (Arábia Saudita), Universidade de Nanquim (China), e Universidade de Melbourne (Austrália). As empresas também tiveram papel fundamental na maturação de métodos de adoção, sendo responsáveis pela geração de artigos e solicitações de patentes, destacando-se *Saudi Aramco* (sediada na Arábia Saudita). A localização dessas instituições não foi considerada aleatória, uma vez que os três países mencionados têm figurado na lista dos principais produtores de GN do mundo. Portanto, é esperado que as universidades e empresas desses países sejam fonte de inovação para a melhoria dos processos de exploração, tratamento, processamento, transporte, distribuição e comercialização de GN.

A prospecção tecnológica também indicou a membrana como principal metodologia para o adoçamento de GN. Mais de 60% dos artigos e das patentes abordaram essa tecnologia, uma vez que as membranas ocupam menos espaço físico, além de serem mais seletivas e específicas aos gases ácidos, estáveis, resistentes e ambientalmente propícias à purificação de GN. As vantagens sobre os métodos convencionalmente empregados como a absorção por aminas, e a multiplicidade de aplicações, tornam as membranas opções produtiva e economicamente superiores. Notou-se que a maior parte dos pesquisadores e requerentes de patentes investigaram majoritariamente a eficiência de separação dos gases, considerado um importante impacto da aplicação da tecnologia de membranas para a purificação de GN. Ademais, os pesquisadores buscaram, preponderantemente, a remoção do CO₂ em detrimento de outros gases ácidos que podem ser encontrados no GN, como H₂S.

O estudo prospectivo mostrou que a escolha da melhor tecnologia deve ser baseada na composição de GN bruto (conhecimento da concentração dos gases ácidos na região onde os poços estão presentes) e na previsão de produção de GN, pois as tecnologias se diferem também pela quantidade de poluente que pode ser removido e pela vazão de gás natural esperada.

Portanto, este estudo evidenciou a relevância da busca por inovações tecnológicas para o adoçamento de GN por pesquisadores e empresas, destacando um cenário promissor para a cadeia produtiva desse combustível, em que a ação integrada e sinérgica entre governo, universidade, centros de pesquisas e empresas poderá garantir uma maior segurança e eficiência ao processo industrial no futuro próximo.

7 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que, a partir das informações deste estudo, em trabalhos futuros, sejam feitos mapas tecnológicos, conhecidos como *roadmaps*. A depender da metodologia adotada, os mapas seriam construídos traçando a ligação entre os métodos e produtos estudados com o mercado, programas de pesquisa e desenvolvimento e recursos, como investimentos e logística. Assim, torna-se viável identificar oportunidades estratégicas nesse setor e fornecer suporte aos principais agentes do mercado na formulação de planos de longo prazo e na tomada de decisões fundamentadas.

8 REFERÊNCIAS

ABDELNABY, Mahmoud M. *et al.* Novel porous organic polymer for the concurrent and selective removal of hydrogen sulfide and carbon dioxide from natural gas streams. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 12, n. 42, p. 47984-47992, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acسامي.0c14259>.

ABEJÓN, Ricardo; CASADO-COTERILLO, Clara; GAREA, Aurora. Techno-economic optimization of multistage membrane processes with innovative hollow fiber modules for the production of high-purity CO₂ and CH₄ from different sources. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 61, n. 23, p. 8149-8165, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01138open_in_new.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Informação e documentação - Artigo em publicação periódica científica impressa - Apresentação. Brasil, 2003. Disponível em: <https://posticsenasp.ufsc.br/files/2014/04/abntnbr6022.pdf>.

ABOOALI, Danial; SOLEIMANI, Reza; REZAEI-YAZDI, Ali. Modeling CO₂ absorption in aqueous solutions of DEA, MDEA, and DEA+ MDEA based on intelligent methods. **Separation Science and Technology**, v. 55, n. 4, p. 697-707, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1575415>.

AGUIAR, Melise Ferreira. Adsorção de compostos sulfurados do gás natural por diferentes adsorventes e dessorção utilizando CO₂ supercrítico. 2016. Disponível em: <https://rima.ufrj.br/jspui/handle/20.500.14407/13360>.

AHMADIJOKANI, Farhad *et al.* Impact of scale, activation solvents, and aged conditions on gas adsorption properties of UiO-66. **Journal of Environmental Management**, v. 274, p. 111155, 2020.

ALLAM, Rodney John; RAFATI, Navid. Separation of sulfurous materials. Titular: 8 Rivers Capital LLC. US n. 12116543 B2. Depósito: 15 out. 2024.

ALVES, Adrielle Ferreira; KOMESU, Andrea. Dimensionamento de um vaso separador trifásico horizontal para uma FPSO no pré-sal da Bacia de Santos: aplicação de um modelo semiempírico. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 12, n. 1, p. 16-29, 2025.

ANDREOS, Ronaldo. Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de São Paulo. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-30042013-154221/>.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Nova Lei do Gás (Lei nº 14.134/2021) e Decreto nº 10.712/2022. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gas-natural/transporte-de-gas-natural/nova-lei-do-gas-lei-no-14-134-2021-e-decreto-no-10-712-2021>.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico. [S. l.], 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico>.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Gás natural: ANP aprova revisão das especificações e controles de qualidade. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/gas-natural-anp-aprova-revisao-das-especificacoes-e-controles-de-qualidade.

ARAMCO. **Our history.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.aramco.com/en/about-us/our-history>.

ARAÚJO, Carla; FELIX, Márcio. Gás não convencional: oportunidades e desafios para o país. In: **Gás não convencional: oportunidades e desafios para o país.** [S. l.], 30 out. 2024. Disponível em: <https://valordaenergia.com.br/noticias/gas-nao-convencional-oportunidades-e-desafios-para-o-brasil/>.

ARREDONDO, Sylvana Ferrari; MACHADO, Eduardo Luiz. Gás de Xisto: Solução ou Problema?. In: Economia Brasileira em Debate: Subsídios ao Desenvolvimento. Blucher Open Access, 2019. p. 47-72. DOI: 10.5151/9788580393330-03.

ARVELOS, Sarah. Modelagem termodinâmica da adsorção de gases: um estudo teórico-computacional sobre sistemas não-ideais. 2017. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2017.178>.

ATLASKIN, Artem A. *et al.* Towards the potential of trihexyltetradecylphosphonium indazolidine with aprotic heterocyclic ionic liquid as an efficient absorbent for membrane-assisted gas absorption technique for acid gas removal applications. **Separation and Purification Technology**, v. 257, p. 117835, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117835>.

AZEVEDO, José Sergio Gabrielli de; LEÃO, Rodrigo Pimentel Ferreira. A mudança estrutural da precificação do petróleo (1970-1991): da força da Opep ao domínio dos mercados consumidores e das finanças. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia.

BAGNATO, Vanderlei Salvador, *et al.* Guia Prático II: transferência de tecnologia parcerias entre universidade e empresa. São Paulo: Agência USP de Inovação, 2016.

BAHAMON, Daniel *et al.* Performance of activated carbons derived from date seeds in CO₂ swing adsorption determined by combining experimental and molecular simulation data. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 15, p. 7161-7173, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b05542>.

BALDUINO, Maria Clara de Jesus Manicoba. Mudanças climáticas: análise da implementação das contribuições nacionalmente determinadas do Brasil no Acordo de Paris. 2020.

- BARCANTE, Mauricio Felix de Souza. Estudo de emulsões água em óleo para formação de hidratos. 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.28368>.
- BARNES, Stuart *et al.* Rate enhancement of gas capture processes. Titular: C-Capture Ltd. US n. 20230249127 A1. Depósito: 10 ago. 2023.
- BARCELOS, Mariana Vieira. O gás natural como fonte geradora na diversificação da matriz elétrica brasileira. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i4.45556>.
- Balanço Energético Nacional. Balanço Energético Nacional 2024. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>.
- BENTES, Flavio Maldonado; PEREIRA, Luís Paulo Neves da Silva. Estudo prático de análise de segurança através de testes do conjunto de suspensão de veículos de passeio antes e depois da instalação de kit GNV. Projectus, v. 9, n. 1, p. 15-43, 2024.
- BHOMICK, Parimal Chandra; RAO, KazaSomasekhara. Sources and effects of hydrogen sulfide. Journal of Applicable Chemistry, v. 3, n. 3, p. 914-918, 2014.
- BHUWANIA, Nitesh; CHINN, Daniel. Membrane-based natural gas sweetening under humid conditions. Titular: Chevron USA Inc. WO n. 2023/220203 A1. Depósito: 16 nov. 2023.
- BORGES, Felipe Marques. Simulação do processo de adoçamento do tratamento primário do gás natural em plataformas de extração offshore. 2023. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) -- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36771>.
- BORJA, Florianne Castillo. Líquidos iónicos: métodos de síntesis y aplicaciones. **Conciencia Tecnológica**, n. 49, p. 52-56, 2015.
- BORSCHIVER, Suzana. Roadmap: histórico e formatos. In: RIBEIRO, Núbia Moura *et al.* Série: **Prospecção Tecnológica**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 60-90.
- BORSCHIVER, S; SILVA, A.L.R.DA. MAPEAMENTO TECNOLÓGICO PARA PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS E SEU APROVEITAMENTO: PANORAMA MUNDIAL E INICIATIVAS NACIONAIS. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2014.
- BORSCHIVER, S; JESUS, A.O.C; MOREIRA, V.A. REUSO DE AGUA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 9401-9408, 2015.
- BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. Technology Roadmap: Planejamento Estratégico para alinhar Mercado-Produto-Tecnologia. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2016. ISBN:9788571933866.
- BRASIL. Emenda Constitucional nº 5, de 15 de agosto de 1995. Altera o § 2º do art. 25 da Constituição Federal. [S. l.], 1995a.
- BRASIL. Emenda Constitucional nº 9, de 09 de novembro de 1995. Dá nova redação ao art. 177, da Constituição Federal, alterando e inserindo parágrafos. [S. l.], 1995b.

BUI, Mai *et al.* Carbon capture and storage (CCS): the way forward. **Energy & Environmental Science**, v. 11, n. 5, p. 1062-1176, 2018. DOI: [10.1039/C7EE02342A](https://doi.org/10.1039/C7EE02342A).

BUMB, Prateek. Carbon capture solvents having alcohols and amines and methods for using such solvents. Titular: Carbon Clean Solutions Limited. US n. 20210236984 A1. Depósito: 05 ago. 2021.

CASTRO, Priscila Balloussier de *et al.* A Importância das Marcas na Proteção Patentária: o caso Natura. Rev. C&Trópico, v. 46, n. 2, p. 63-86, 2022. DOI: [https://doi.org/10.33148/cetropicov46n2\(2022\)art4](https://doi.org/10.33148/cetropicov46n2(2022)art4).

Centro Brasileiro de Infraestrutura. Como são categorizadas as reservas de óleo e gás?. In: **Centro Brasileiro de Infraestrutura** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://cbie.com.br/como-sao-categorizadas-as-reservas-de-oleo-e-gas/>.

CERVEIRA, Graziela Salvan. Remoção de CO₂ do biogás por permeação em membranas. 2016.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. SULFETO DE HIDROGÊNIO. In: Ficha de Informação de Produto Químico. [S. l.], 2025a. Disponível em: https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=SULFETO%20DE%20HIDROG%C3%A7AO.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. DIÓXIDO DE CARBONO. In: Ficha de Informação de Produto Químico. [S. l.], 2025b. Disponível em: https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=DI%D3XIDO%20DE%20CARBONO.

Chemiewerk Bad Köstritz. História. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.cwk-bk.de/de/unternehmen/geschichte>.

CHEMISTRY WORLD. China opens clean energy lab. In: China opens clean energy lab. [S. l.], 2011. Disponível em: <https://www.chemistryworld.com/news/china-opens-clean-energy-lab/3000958.article>.

CHEVRON. Who we are. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.chevron.com/who-we-are/history>.

CHISCA, Stefan *et al.* Thermally crosslinked polytriazole separation membranes. Titular: King Abdullah University of Science and Technology. US n. 20240390865 A1. Depósito: 28 nov. 2024.

COELHO, Karoline Mota; BORSCHIVER, Suzana. Roadmap tecnológico do ácido levulínico produzido a partir de biomassa lignocelulósica. **Cadernos de Prospecção, Salvador**, v. 9, n. 4, p. 481-492, 2016.

COSTA, Henrique Hipólito *et al.* Abordagem simplificada para o projeto e análise preliminar de custos de sistemas de compressão de gás natural em plataformas. 2021. Disponível em: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/16630>.

COUTO, Gabriel Prevot. Passo a Passo para Conseguir Sua Patente. In: JUSBRASIL. **Jusbrasil Artigos**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/passo-a-passo-para-conseguir-sua-patente/2427443901?msockid=169c7940386d600e069d6d2b393a6169>.

DARANI, Nasrin Salimi *et al.* Simulation and optimization of the acid gas absorption process by an aqueous diethanolamine solution in a natural gas sweetening unit. **ACS omega**, v. 6, n. 18, p. 12072-12080, 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.1c00744>.

DENG, Liyuan. Membrane contactor comprising a composite membrane of a porous layer and a non-porous selective polymer layer for CO₂ separation from a mixed gaseous feed stream. Titular: NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. US n. 20180264399 A1. Depósito: 20 set. 2018.

DENG, Liyuan, LI, Jun. Process for separating a gas from a gaseous mixture by a liquid absorbent comprising a polyethylene glycol and an ionic liquid. Titular: Individual. EP n. 3047895 A1. Depósito: 27 jul. 2016.

DENG, Liyuan; SAEED, Muhammad. Composite membrane. Titular: NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. WO n. 2016162518 A1. Depósito: 13 out. 2016.

DOMÍNGUEZ, Pedro López. Sustainable synthesis of Metal-Organic Frameworks (MOF). 2015.

DUARTE, Dalísia Cristina dos Santos. O pioneirismo dos Estados Unidos na tecnologia de exploração do gás não convencional e os debates associados. 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/830>.

DUDLÁK, Tamás. After the sanctions: Policy challenges in transition to a new political economy of the Iranian oil and gas sectors. **Energy policy**, v. 121, p. 464-475, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.06.034>.

DUSSELIER, Michiel *et al.* Gas separation membranes. Titular: KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN. WO n. 2023209112 A1. Depósito: 02 nov. 2023.

DUTRA, Joísa; RODRIGUES, Mirella; LISBONA, Diogo. Distribuição de gás natural no Brasil: Dados e aspectos regulatórios. **FGV CERI**, [s. l.], 2019.

Eindhoven University of Technology. **Our University**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.tue.nl/en/our-university?_gl=1*_111xlzs*_up*MQ..*_ga*ODk4MzM2Mjk2LjE3NTE4NTYyMzA.*_ga_JN37M497TT*cxE3NTE4NTYyMzAkzbEkZzAkdDE3NTE4NTYyMzAkajYwJGwwJGgw.

ELLAF, Aisha *et al.* Energy, exergy, economic, environment, exergo-environment based assessment of amine-based hybrid solvents for natural gas sweetening. **Chemosphere**, v. 313, p. 137426, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137426>.

ELSEVIER. **Scopus**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.elsevier.com/products/scopus>.

ENERGY. **History.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.energy.gov/lm/history>.

FERREIRA, Ellen de Fátima. Síntese de material adsorvente de gás sulfídrico a partir de resíduos de mineração. 2021. Disponível em:
<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2293>.

FISHER, Jonah; POYNTING, Mark. What is carbon capture and how does it fight climate change?. In: BBC NEWS. **BBC News Climate & Science.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/science-environment-64723497>.

FREITAS, Felipe; ALMEIDA, Edmar de. Como anda a abertura do mercado de gás natural no Brasil: Uma análise da implementação da Nova Lei do Gás. **Ensaio Energético**, [s. l.], 2024.

GASNET. Entendendo o GNV. In: **Gás Natural Veicular.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.gasnet.com.br/GNV/Entendendo>.

GENTIL, VICENTE. Corrosão. 6^a. Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GEROSA, Tatiana Magalhães; MATAI, Patrícia Helena Lara dos Santos. A Cadeia produtiva do gás natural do Brasil, suas evoluções e infra-estrutura. XI CBE: anais, 2006.

GLEASON, Karen K. Ultra-thin, Pinhole-free, Flexible Metal-Organic Films. Titular: Massachusetts Institute of Technology. US n. 2017/01588095 A1. Depósito: 08 jun. 2017.

GUO, Ru *et al.* Low carbon development and local sustainability from a carbon balance perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 270-279, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.019>.

GUTIERREZ, Alberto; ATILHAN, Mert; APARICIO, Santiago. Microscopic characterization of CO₂ and H₂S removal by sulfolane. **Energy & Fuels**, v. 31, n. 9, p. 9800-9813, 2017. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.7b01577>.

GUTIERREZ, Maria Bernadete Gomes Pereira Sarmiento. O setor de gás natural no Brasil: uma comparação com os países da OCDE. Texto para Discussão, 2022. DOI: 10.38116/td2777.

HAFEZI, Reza *et al.* Iran in the emerging global natural gas market: A scenario-based competitive analysis and policy assessment. **Resources Policy**, v. 68, p. 101790, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101790>.

HAN, Xiaocui *et al.* Ultrapерmeable polymeric membranes based on particular ultra-rigid units for enhanced gas separation. **Journal of Membrane Science**, v. 629, p. 119284, 2021.

HALLIBURTON. **Low Carbon Solutions.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.halliburton.com/en/low-carbon-solutions/carbon-capture-utilization-storage>.

HAN, Xiaocui *et al.* Ultrapерmeable polymeric membranes based on particular ultra-rigid units for enhanced gas separation. **Journal of Membrane Science**, v. 629, p. 119284, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119284>.

HAN, Yang; HO, W.S Winston; HU, Jingying. Polyguanidine-containing membranes and methods of using thereof. Titular: Chevron USA Inc. WO n. 2024/059033 A3. Depósito: 21 mar. 2024.

HASSAN, Tengku Nur Adibag Tengku *et al.* Insights on Cryogenic Distillation Technology for Simultaneous CO₂ and H₂S Removal for Sour Gas Fields. **Molecules**, v. 27, n. 4, p. 1424, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules27041424>.

HAYEK, Ali; ALSAMAH, Abdulkarim. Halogen-substituted 9,9-bis(4-aminophenyl)fluorene based polyimide membranes for gas separation applications. Titular: Saudi Arabian Oil Co. US n. 20240024828 A1. Depósito: 25 jan. 2024b.

HAYEK, Ali; ALSAMAH, Abdulkarim. Hydroxyl-functionalized cardo-based polyimide membranes. Titular: Saudi Arabian Oil Co. US n. 20240150519 A1. Depósito: 09 mai. 2024a.

HAYS, Jake *et al.* Considerations for the development of shale gas in the United Kingdom. **Science of The Total Environment**, v. 512, p. 36-42, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.004>.

HAZARIKA, Gauri; GOSWAMI, Subrata; INGOLE, Pravin G. Advances of membrane technology in gas separation. In: **Advances in Separation Sciences**. Elsevier, 2025. p. 191-210. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95292-7.00007-4>.

HEIDARI, Mahsa *et al.* Synthesis and fabrication of adsorptive carbon nanoparticles (ACNs)/PDMS mixed matrix membranes for efficient CO₂/CH₄ and C₃H₈/CH₄ separation. **Separation and Purification Technology**, v. 209, p. 503-515, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.055>.

HENNI, Nadir; HENNI, Amr; IBRAHIM, Hussameldin. Solubility of carbon dioxide in promising methylimidazolium-based ionic liquids. **Fluid Phase Equilibria**, v. 565, p. 113619, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2022.113619>.

HUANG, Kuan *et al.* Hydrophobic protic ionic liquids tethered with tertiary amine group for highly efficient and selective absorption of H₂S from CO₂. **AICHE Journal**, v. 62, n. 12, p. 4480-4490, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aic.15363>.

HUANG, Weijie *et al.* Large surface-to-volume-ratio and ultrahigh selectivity SSZ-13 membranes on 61-channel monoliths for efficient separation of CO₂/CH₄ mixture. **Separation and Purification Technology**, v. 311, p. 123285, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123285>.

HUSSIN, Farihahusnah; AROUA, Mohamed Kheireddine. Recent trends in the development of adsorption technologies for carbon dioxide capture: A brief literature and patent reviews (2014–2018). **Journal of Cleaner Production**, v. 253, Apr. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619345779?via%3Dihub>.

Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (Brasil). Maiores produtores mundiais de gás natural em 2021. In: **Maiores produtores mundiais de gás natural em 2021**. [S. l.], 2022a. Disponível

em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-produtores-mundiais-de-gas-natural-em-2020/>.

Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (Brasil). Maiores produtores mundiais de gás natural em 2021. In: **Maiores consumidores de gás natural em 2021**. [S. l.], 2022b. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-consumidores-de-gas-natural-em-2020/>.

IDAKWOJI, Abdulhameed Abenelo; NZEREM, Petrus; ISSA, Saheed Olanrewaju. Simulation-Based Techno-Economic Assessment of a Water-Lean Solvent for Natural Gas Sweetening Technology. **Engineering Proceedings**, v. 56, n. 1, p. 104, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15370>.

International Energy Agency. **Energy system of China**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/China>.

International Energy Agency. **Global Energy Review 2025 Dataset**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-energy-review-2025-dataset>.

JAMES, Stuart; TSANG, Min Ying; CAHIR, John. Verfahren zur adsorption eines gases in eine flüssigkeit. Titular: Universidade da Rainha de Belfast. EP n. 3790646 B1. Depósito: 17 mar. 2021. Concessão: 01 jan. 2025.

JUNG, Wonji et al. Water membrane for carbon dioxide separation. **Separation and Purification Technology**, v. 203, p. 268-273, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.054>.

King Abdullah University of Science and Technology. **About**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.kaust.edu.sa/en/about/>.

KAZMI, Bilal et al. Energy, exergy and economic (3E) evaluation of CO₂ capture from natural gas using pyridinium functionalized ionic liquids: A simulation study. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 90, p. 103951, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103951>.

KUMAR, Kishant; KUMAR, Amit. Enhanced CO₂ adsorption and separation in ionic-liquid-impregnated mesoporous silica MCM-41: a molecular simulation study. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 122, n. 15, p. 8216-8227, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b11529>.

LAI, Holden Wan Hong et al. High-performance ladder polymers for membrane gas separation. Titular: The Board of Trustee of the Leland Stanford Junior University. US n. 2022/0411574A1. Depósito: 29 dez. 2022.

LEMOS, José Késsio; PACHECO, Cristina Carvalho. As crises do petróleo e a geoestratégia dos Estados Unidos para o Golfo Pérsico entre 1945 e 1980. **Estudos Internacionais: revista de relações internacionais da PUC Minas**, v. 4, n. 2, p. 17-34, 2016. Disponível em: <http://orcid.org/0000-0002-1306-3161>.

LI, Chenjie *et al.* Cellulose acetate mixed-matrix membranes doped with high CO₂ affinity zeolitic tetrazolate-imidazolate framework additives. **Reactive and Functional Polymers**, v. 182, p. 105463, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105463>.

MENG, Zhaosu; SUN, Huike; WANG, Xi. Forecasting energy consumption based on SVR and Markov model: A case study of China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 883711, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.883711>.

LIU, Harry; CONSOLI, Christopher; ZAPANTIS, Alex. Overview of Carbon Capture and Storage (CCS) facilities globally. In: **14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne**. 2018. p. 21-26. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3366353>.

LIU, Yang *et al.* Natural gas sweetening using TEGMC polyimide hollow fiber membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 632, p. 119361, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119361>.

LIU, Yang; YANG, Junyan. Hybrid membranes with functionalized fillers for natural gas sweetening. Titular: Saudi Arabian Oil Co. US n. 11834619 B1. Depósito: 05 dez. 2023.

LIU, Yang; YANG; Junyan; VAIDYA, Milind M. Tunable H₂S and CO₂ condensability membranes for H₂S and CO₂ removal from sour natural gas. Titular: Saudi Arabian Oil Co. US n. 20240198282 A1. Depósito: 20 jun. 2024.

LU, Xiuyang *et al.* High-throughput computational screening of porous polymer networks for natural gas sweetening based on a neural network. **AIChE Journal**, v. 68, n. 1, p. e17433, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aic.17433>.

MA, Guixuan; NING, Guoqing; WEI, Qiang. S-doped carbon materials: Synthesis, properties and applications. **Carbon**, v. 195, p. 328-340, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.03.04>.

MA, Ji *et al.* Finely Tailoring Microstructure of Hyperbranched Polyimide Membrane for Facile Natural Gas Upgrading. **Journal of Membrane Science**, p. 123729, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.123729>.

MA, Xiaohua; GHANEM, Bader S.; PINNAU, Ingo. O-hydroxy-functionalized diamines, polyimides, methods of making each, and methods of use. Titular: King Abdullah University of Science and Technology. US n. 10961349 B2. Depósito: 25 mar. 2019.

MALESKI, Tanisa Paula Silveira; RITTER, Carla Todero. Tecnologias para Separação de Dióxido de Carbono do Gás Natural Associado ao Petróleo. **Revista Conectus: Tecnologia, Gestão e Conhecimento**, v. 1, n. 1, p. 23-23, 2021. Disponível em: <https://revista.ftec.com.br/index.php/01/article/view/23>.

MARTINS, Catharine Fernandez. Estudo do desempenho de um separador trifásico devido aos efeitos dos movimentos de uma FPSO sob ação de ondas do mar. Tese de Doutorado. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2017.

Massachusetts Institute of Technology. **About MIT.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.mit.edu/about/>.

MATIELLO, Sabrina. Avaliação da eficiência de um filtro de adsorção com carvão ativado na purificação de biogás proveniente da fração orgânica dos resíduos urbanos. 2017.

MIRANDA, Ana Lucia Brenner Barreto *et al.* Inovação nas universidades: uma análise do novo marco legal. **Revista ENIAC Pesquisa**, v. 8, n. 1, p. 85-98, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22567/rep.v8i1.507>.

MOGHADDAM, Amin Hedayati. Investigation of natural gas dehydration process using triethylene glycol (TEG) based on statistical approach. **Chemical Papers**, v. 77, n. 3, p. 1433-1443, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02564-8>.

MOHAMMAD, Ameera Fares Rasheed *et al.* Method for capturing CO₂ from effluent gases using a rice-derived product. Titular: United Arab Emirates University. US n. 11311835 A1. Depósito: 26 abr. 2022.

MONTENEGRO, João. Transição energética nos EUA: por ora, o gás natural é o limite. **Conjuntura Global**, v. 11, n. 3, 2022.

MORETH, Djelison Perrut Russell. Membranas de matriz mista preparadas a partir de PEBAK® e compostos tipo hidrotalcita. 2022. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/18971>.

MORGUNOVA, Maria. Why is exploitation of Arctic offshore oil and natural gas resources ongoing? A multi-level perspective on the cases of Norway and Russia. **The Polar Journal**, v. 10, n. 1, p. 64-81, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/2154896X.2020.1757823>.

MOZAFARI, Ahmad *et al.* Amine–membrane hybrid process economics for natural gas sweetening. **Chemical Papers**, v. 73, p. 1585-1603, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11696-019-00709-w>.

Nanjing University. **About.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.nju.edu.cn/en/About.htm>.

NASCIMENTO, Jéssica Barbosa da Silva do *et al.* Modelagem e simulação de um vaso separador horizontal bifásico. 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/336>.

NETO, Sergio Trabali Camargo; Guerra por recursos: a relação entre a política energética dos Estados Unidos e a descoberta do pré-sal no Brasil. 2020.

NOROUZBAHARI, Somayeh; GHARIBI, Reza. UV cross-linked poly (ethylene glycol)-based membranes with different fractional free volumes for CO₂ capture: synthesis, characterization, and thiol-ene modification evaluation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 13, p. 6078-6089, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.iecr.9b06193>.

NUNES, André *et al.* Das relações entre os condicionantes macroeconômicos e a conjuntura política: trade-offs do Estado rentista e da economia da defesa da Arábia Saudita.. 2020. Artigo (Pós-Graduação em Ciências Militares) - Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, [S. l.], 2020.

OLIVEIRA, Sandriely Sonaly Lima. **Membranas de fibra oca a partir de alumina/caulim para tratamento de efluentes.** 2021. Dissertação (doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, PB. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/35950>.

ORTEGOSA, Cássima Zatorre. Metodologia para estudos da viabilidade econômico financeira no uso do gás natural em instalações prediais residenciais: uma abordagem via dinâmica de sistemas. 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/627>.

PARANHOS, Rita de Cassia Santos; RIBEIRO, Núbia Moura. Importância da prospecção tecnológica em base em patentes e seus objetivos da busca. Cadernos de Prospecção, v. 11, n. 5, p. 1274, 2018.

PENG, Lingling *et al.* Facilitated transport separation of CO₂ and H₂S by supported liquid membrane based on task-specific protic ionic liquids. **Green Chemical Engineering**, v. 3, n. 3, p. 259-266, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gce.2021.12.005>.

PEREIRA, M. V. *et al.* Simulation of high-pressure sour natural gas adsorption equilibrium on NaX and NaY zeolites using the multicomponent potential theory of adsorption. **Adsorption**, v. 29, n. 1, p. 65-72, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10450-022-00373-9>.

PERRY, Robert James *et al.* Liquid carbon dioxide absorbents, methods of using the same, and related systems. Titular: GENERAL ELECTRIC COMPANY. US n. 9956520 B2. Depósito: 01 mai. 2018.

PETRONAS. **About us.** [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.petronas.com/about-us>.

PHILIPPI, Marília. Síntese e caracterização de Metal-Organic Framework (MOF) para uso na adsorção de CO₂. 2017. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/7727>.

PINNAU, Ingo *et al.* Polyimide blends, methods of making each and methods of use. Titular: King Abdullah University of Science and Technology. US n. 20200095423 A1. Depósito: 26 mar. 2020.

PINTO, Ana Santos. Arábia Saudita. 2015.

Pinto, Guilherme Edson Merege de Mello Cruz; FERNEDA, Ariê Scherreier; FERRAZ, Miriam Olivia Knopik. Tecnologias aplicadas à mitigação das mudanças climáticas: captura e do armazenamento de carbono à luz do Acordo de Paris . **diké**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufs.br/dike/article/view/22653>.

PINTO, Lucas Lopes. A Universidade e a Inovação Tecnológica para o Desenvolvimento Econômico e Social. In: JÚNIOR, Gilson Pôrto; COSTA, Jeferson Morais da; SOARES, Leandra Cristina Cavina Piovesan. **PROPRIEDADE INTELECTUAL E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA: estudos e aplicações**. [S. l.: s. n.], 2021. p. 98-110.

PIRES, Edilson Araújo; RIBEIRO, Nubia Moura; QUINTELLA, Cristina M. Sistemas de busca de patentes: análise comparativa entre espacenet, patentscope, google patents, lens, derwent innovation index e orbit intelligence. **Cadernos de prospecção**, v. 13, n. 1, p. 13-13, 2020.

QAZVINI, Omid Taheri; TELFER, Shane. Metal-organic frameworks for gas adsorption. Titular: Massey University. CA n. 3123380 A1. Depósito: 25 jun. 2020.

QUARANTA, Isabella Christina Cavalcante. Dimensionamento de uma coluna de absorção para processamento de gás natural. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/57758>.

Queen's University Belfast. **About us**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.qub.ac.uk/about/>.

QUEIROZ, A. P. Avaliação do desempenho de diferentes alanolaminas na remoção de gases ácidos do biogás por absorção química. 2016.

QUEK, Ven Chian; SHAH, Nilay; CHACHUAT, Benoît. Plant-wide assessment of high-pressure membrane contactors in natural gas sweetening—Part II: Process analysis. **Separation and Purification Technology**, v. 258, p. 117938, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117938>.

RAHIMALIMAMAGHANI, Arash *et al.* A process for the preparation of a supported carbon membranes (CMS). Titular: TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN, FUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION. US n. 20250059043 A1. Depósito: 20 fev. 2025.

RAHIMPOUR, Mohammad Reza; MAKAREM, Mohammad Amin; MESHKSAR, Maryam (Ed.). Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Volume 2: Natural Gas Sweetening. Elsevier, 2024.

RAMEZANI, Rouzbeh *et al.* Using a superstructure approach for techno-economic analysis of membrane processes. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 199, p. 296-311, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.10.007>.

REI, Fernando Cardozo Fernandes; GONÇALVES, Alcindo Fernandes; DE SOUZA, Luciano Pereira. Acordo de Paris: reflexões e desafios para o regime internacional de mudanças climáticas. **Veredas do Direito**, v. 14, n. 29, p. 81-99, 2017.

REIS, Humberto LS *et al.* Gás natural. Recursos minerais de Minas Gerais. Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), Belo Horizonte, p. 1-39, 2018.

RENCO. **Who we are**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.renco.it/who-we-are>.

RIBEIRO, Rafael Teixeira da Silva. Estratégias cooperativas para o mercado brasileiro de gás natural: uma aplicação do método de Shapley. 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/8018>.

ROCHELLE, Gary; DU, Yang; YAN, Ye. Blends of thermally degraded amines for CO₂ capture. Titular: THE UNIVERSITY OF TEXAS SYSTEM. WO n. 2017165339 A1. Depósito: 28 set. 2017.

RODRIGUES, Mariana Santos *et al.* ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA REMOÇÃO DE CO₂ DE UMA CORRENTE DE GÁS NATURAL POR DEA OU MEA. **Seminário Estudantil de Produção Acadêmica**, v. 16, 2018.

RONDÓN, Jairo; LUGO, Claudio. Natural Gas Sweetening Technologies: A Technical and Comparative Analysis of Processes and Applications, 2025.

ROPKINSON, David P. *et al.* Di-substituted siloxane solvents for gas capture. Titular: US Department of Energy. US n. 20190358585 A1. Depósito: 28 nov. 2019.

ROSA, Robison Armando da. Utilização de usina termoelétrica a gás natural como garantidora do suprimento elétrico durante a transição energética no Paraná: estudo de caso. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2024. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/35549>.

ROSA, Sandro Guimarães Viveiros. **Monitoramento tecnológico de kits de diagnósticos, vacinas e tratamentos para a infecção pelo vírus Zika**. 2022. Dissertação (doutorado) - Universidade Federal Fluminense, Faculdade de Farmácia, Niterói, RJ.

SACRAMENTO, Diosael Ferreira. Aspectos fundamentais da indústria do gás natural e breve panorama do continente africano. 2023.

SAHA, Dipendu *et al.* Adsorptive separation of CO₂ in sulfur-doped nanoporous carbons: Selectivity and breakthrough simulation. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 241, p. 226-237, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.12.015>.

SANDRU, Marius; SANDRU, Eugenia Mariana; STENSTAD, Per Martin. Hybrid polymer membrane. Titular: Sintef Tto AS. US n. 20210229031 A1. Depósito: 29 jul. 2021.

SANTOS, Ronney José Oliveira *et al.* Gás Natural: Cenário da Produção e Processos de Tratamento. 2021.

SAYED, Osama H.; MASRAHI, Yahya S. Climatology and phytogeography of Saudi Arabia. A review. **Arid Land Research and Management**, v. 37, n. 3, p. 311-368, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15324982.2023.2169846>.

SCHOLES, Colin A. Blended perfluoropolymer membranes for carbon dioxide separation by miscible and immiscible morphologies. **Journal of Membrane Science**, v. 618, p. 118675, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118675>.

SEABRA, Rute *et al.* Adsorption equilibrium and kinetics of carbon dioxide, methane and nitrogen on binderless zeolite 4A adsorbents. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 277, p. 105-114, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.10.024>.

SHI, Mingzhen *et al.* Highly efficient and selective H₂S capture by task-specific deep eutectic solvents through chemical dual-site absorption. **Separation and Purification Technology**, v. 283, p. 120167, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120167>.

SIGNORINI, Virginia *et al.* Permeation of ternary mixture containing H₂S, CO₂ and CH₄ in Aquivion® perfluorosulfonic acid (PFSA) ionomer membranes. **Membranes**, v. 12, n. 11, p. 1034, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes12111034>.

SILVA, Nathan Moraes Pinto da. Diplomacia à prova de choque: as relações com países exportadores de petróleo e a busca pela segurança energética na política externa brasileira durante os governos Geisel e Figueiredo (1974-1985). 2021. 134 f. Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em:
<http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/16487>.

SIN, Maria *et al.* In situ ¹³C NMR spectroscopy study of CO₂/CH₄ mixture adsorption by metal–organic frameworks: does flexibility influence selectivity?. **Langmuir**, v. 35, n. 8, p. 3162-3170, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b03554>.

SINOPEC. **Our History**. [S. l.], 2025. Disponível em:
<http://www.sinopet.com/listco/en/000/000/041/41665.shtml>.

SLAUGHTER, Andrew. **Global supply and market impacts of US unconventional oil production growth**. 2013.

SOARES, Daniel David Pereira. **Transição Energética e o Papel do Brasil na OPEP+: equilibrando a produção e o consumo sustentável de petróleo e energias limpas**. 2024. Dissertação (graduação) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

SOARES, Sandro Vieira; PICOLLI, Icaro Roberto Azevedo; CASAGRANDE, Jacir Leonir. Pesquisa Bibliográfica, Pesquisa Bibliométrica, Artigo de Revisão e Ensaio Teórico em Administração e Contabilidade Administração: Ensino e Pesquisa. In: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO. **Administração: Ensino e Pesquisa**. [S. l.: s. n.], 2018. p. 308-339.

SOLVAY. **About Solvay**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.solvay.com/en/our-company>.

SOLVIONIC. **The Company**. [S. l.], 2025. Disponível em:
<https://solvionic.com/en/content/the-company>.

SONG, Chunfeng *et al.* Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 101, p. 265-278, 2019.

SOUZA, Marina Maciel Dias de. **Análise da viabilidade técnica e econômica de processar o gás natural para venda em plataformas de campos de gás retrógrado offshore.** 2017. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-AVBNFE>.

SOUZA, Rafael Rovai Giglio de. **Estudo de viabilidade técnica e econômica de uma solução pronta de cogeração.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/86f1e6b7-b5de-4f77-a94a-9398e8ffa4f3/RAFAEL%20ROVAI%20GIGLIO%20DE%20SOUZA.pdf>.

SPEIGHT, James G. Natural gas: a basic handbook. Gulf Professional Publishing, 2018.

STATISTA. **Natural gas consumption worldwide from 1998 to 2023.** [S. l.], 2025a. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/282717/global-natural-gas-consumption/>.

STATISTA. **Natural gas production worldwide from 1998 to 2023.** [S. l.], 2025b. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/265344/total-global-natural-gas-production-since-1998/>.

STEWART, Maurice; ARNOLD, Ken. Gas sweetening and processing field manual. Gulf Professional Publishing, 2011.

SULEMAN, Humbul *et al.* A simple model for estimating hydrogen sulfide solubility in aqueous alkanolamines in the high pressure-high gas loading region. **Journal of Sulfur Chemistry**, v. 42, n. 4, p. 410-425, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17415993.2021.1895995>.

SUNDELL, Benjamin James *et al.* CO₂-philic crosslinked polyethylene glycol-based membranes for acid and sour gas separations. Titular: SAUDI ARABIAN OIL COMPANY. WO n. 2022147579 A1. Depósito: 07 jul. 2022.

TACHY, Diego Enriquez. **Avaliação técnica e econômica da captura de CO₂ por membrana, absorção e tecnologias híbridas.** 2017. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, BA. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21689>.

TAQVI, Syed Ali Ammar; DURRESHEHWAR, Zaeem; HASLINDA, Zabiri. "Natural gas CO₂-rich sweetening via adsorption processes." In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Volume 2: Natural Gas Sweetening*, pp. 395-416. Elsevier, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19217-3.00005-2>.

TAVARES, A. S., BORSCHIVER, S. "Elaboração de Roadmap Tecnológico e de Modelo de Negócios de Economia Circular", Cadernos de Prospecção, v. 14, n. 3, p. 810, 2021. DOI: 10.9771/cp.v14i3.39052.

TEIXEIRA, Cássio Adriano Nunes *et al.* Gás natural: um combustível-chave para uma economia de baixo carbono. 2021. Disponível em: <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20802>.

TEIXEIRA, João Pedro Braga. Gás natural: O energético mais competitivo. Rio de Janeiro: Pod Editora, 2015. 102 p.

THOMPSON, Robert L.; CULP, Jeffrey T.. Beta-Amino Carboxylate (BAC) Solvents for Enhanced CO₂ Separations. Titular: Battelle Memorial Institute Inc. US n. 20230321591 A1. Depósito: 12 oct. 2023.

TIKADAR, Debasish; GUJARATHI, Ashish M.; GURIA, Chandan. Multi-objective optimization of industrial gas-sweetening operations using economic and environmental criteria. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 140, p. 283-298, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.006>.

TINÔCO, Daniel *et al.* Technological development of the bio-based 2, 3-butanediol process. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 15, n. 2, p. 357-376, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.2173>.

TORRE-CELEIZABAL, Andrea *et al.* Chitosan-based mixed matrix composite membranes for CO₂/CH₄ mixed gas separation. Experimental characterization and performance validation. **Separation and Purification Technology**, v. 325, p. 124535, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124535>.

TOSCANO, L. “Estudo Comparativo por Otimização Termoeconômica de Sistemas de Separação de Gás Carbônico por Membranas em Plataformas de Petróleo”. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE – UFRJ. 2015.

University of Melbourne. **About us**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://about.unimelb.edu.au/?in_c=mega.

VAZ, Célio Eduardo Martins; MAIA, João Luiz Ponce; SANTOS, Walmir Gomes dos. Tecnologia da Indústria do Gás Natural. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

VELHOS, João Vitor. Análise do Impacto da Variação da Composição do Gás Natural no Processo Single Mixed Refrigerant – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/182368>.

VIANA, Fernando Luiz E. Petróleo e gás natural. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 4, n.104, 2019. Disponível em: [s1dspp01.dmz.bn:8443/s482-dspace/handle/123456789/1193](https://dspace.senac.br/handle/123456789/1193).

WANG, Yao *et al.* Exploring the effect of ligand-originated MOF isomerism and methoxy group functionalization on selective acetylene/methane and carbon dioxide/methane adsorption properties in two NbO-type MOFs. **ACS applied materials & interfaces**, v. 10, n. 24, p. 20559-20568, 2018. DOI: [10.1021/acsami.8b05216](https://doi.org/10.1021/acsami.8b05216).

WEIKERT, Clara Vilela. **Simulação e avaliação do desempenho de um solvente verde - Eutético Profundo (DES) e de solventes convencionais para a remoção dos gases ácidos CO₂ e H₂S de correntes de gás natural**. 2021. 1 recurso online (180 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/7933>.

WILFONG, Walter C. *et al.* A pelletized immobilized amine sorbent for CO₂ capture. Titular: NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE. WO n. 2020055527 A1. Depósito: 19 mar. 2020.

WIPO. **Patentscope**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.wipo.int/en/web/patentscope/>.

XIE, Wei *et al.* Highly selective benzimidazole-based polyimide/ionic polyimide membranes for pure-and mixed-gas CO₂/CH₄ separation. **Separation and Purification Technology**, v. 282, p. 120091, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120091>.

YAHAYA, Garba Oloriegbe *et al.* Aromatic co-polyimide gas separation membranes derived from 6FDA-6FPDA-type homo-polyimides. Titular: Saudi Aramco. WO n. 2020176585 A1. Depósito: 03 set. 2020.

YANG, Jianhong. Analysis of sustainable development of natural gas market in China. **Natural Gas Industry B**, v. 5, n. 6, p. 644-651, 2018. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2018.11.013>.

YANG, Junyan; LI, Sipei. Crown ether-containing polymer. Titular: SAUDI ARABIAN OIL COMPANY. US n. 202040218127 A1. Depósito: 04 jul. 2024.

YANG, Wei; WANG, Xueke. The impact of patent protection on technological innovation: A global value chain division of labor perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, 203, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123370>.

YI, Shouliang *et al.* Compositions and methods for membrane separation of acid gas from hydrocarbon gas. Titular: GEORGIA TECH RESEARCH CORPORATION, KING ABDULLAH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. WO n. 2019006045 A1. Depósito: 03 jan. 2019b.

YI, Shouliang *et al.* Ultraselective glassy polymer membranes with unprecedented performance for energy-efficient sour gas separation. **Science advances**, v. 5, n. 5, p. eaaw5459, 2019a. DOI: [10.1126/sciadv.aaw5459](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw5459).

ZEN, Barbara Potrich. Síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão e aplicação como adsorventes. 2016.

ZHANG, Jindong *et al.* Natural gas market and underground gas storage development in China. **Journal of Energy Storage**, v. 29, p. 101338, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101338>.

ZHANG, ZhaoQiang *et al.* Methods for adsorbing carbon dioxide. Titular: NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE. WO n. 20204123249 A1. Depósito: 13 jun. 2024.