

AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL DE TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE LÍQUIDOS DE GÁS NATURAL: TENDÊNCIAS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

EXERGOENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF NATURAL GAS LIQUIDS RECOVERY TECHNOLOGIES: TRENDS, CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES

Cláudia Carvalho Santos - Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil. claudia.santos.19@edu.ufes.br

Profº Dr. Daniel da Cunha Ribeiro - Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil. daniel.ribeiro@ufes.br

Profº Dr. Marcos Wagner Jesus Servare Junior - Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil. marcos.servare@ufes.br

Profº Dr. Marcelo Silveira Bachelos - Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil. marcelo.bachelos@ufes.br

Resumo

Alinhada à transição energética, a recuperação de líquidos de gás natural (LGN) aumenta a rentabilidade do setor, mas as rotas criogênicas tradicionais sofrem com a intensidade energética e irreversibilidades termodinâmicas. Para mitigar os custos e as emissões indiretas associadas, a análise exergoambiental surge como uma ferramenta diagnóstica essencial. Este estudo avaliou sistematicamente as tendências e lacunas científicas dessa abordagem aplicada ao processamento de LGN. Empregou-se o método ProKnow-C integrado à bibliometria computacional (pacote Bibliometrix em R) para mapear as bases Scopus e Web of Science no horizonte de 2021 a 2026. O portfólio de 1.063 documentos analisado revelou um crescimento de 72,4% nas publicações anuais (2022–2025). Constatou-se o domínio de tecnologias com turboexpansores para eficiência e o uso de Metildietanolamina (MDEA) para captura de CO₂, além de uma transição metodológica para indicadores multidimensionais (4E e 5E). Contudo, detectou-se uma escassez de estudos comparativos padronizados e de integração com a cadeia

do hidrogênio. Conclui-se que a avaliação exergoambiental evoluiu de um indicador acadêmico para uma ferramenta de tomada de decisão no projeto de plantas industriais.

Palavras-chave: Líquidos de Gás Natural; Análise Exergoambiental; ProKnow-C; Bibliometrix; Eficiência Termodinâmica.

Abstract

Aligned with the energy transition, natural gas liquid (NGL) recovery boosts sector profitability; however, traditional cryogenic routes suffer from high energy intensity and thermodynamic irreversibilities. To mitigate associated costs and indirect emissions, exergoenvironmental analysis has emerged as an essential diagnostic tool. This study systematically evaluated scientific trends and gaps regarding this approach as applied to NGL processing. The ProKnow-C method, integrated with computational bibliometrics (using the Bibliometrix R package), was employed to map the Scopus and Web of Science databases for the 2021–2026 period. The analyzed portfolio of 1,063 documents revealed a 72.4% growth in annual publications (2022–2025). Findings highlighted the dominance of turboexpander technologies for efficiency and the use of methyldiethanolamine (MDEA) for CO₂ capture, alongside a methodological shift toward multidimensional indicators (4E and 5E). However, a scarcity of standardized comparative studies and integration with the hydrogen value chain was observed. The study concludes that exergoenvironmental assessment has evolved from a purely academic metric into a decision-making tool for industrial plant design.

Keywords: Natural Gas Liquids; Exergoenvironmental Analysis; ProKnow-C; Bibliometrix; Thermodynamic Efficiency.

1. Introdução

O cenário energético atual encontra-se em processo de transição devido a necessidade de descarbonizar as matrizes industriais globais e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2023). Nesse cenário de substituição gradativa de combustíveis fósseis, o gás natural se fortalece como um combustível de transição estratégico, experimentando um crescimento contínuo de consumo devido sua queima limpa e alta eficiência específica (IEA, 2024).

O crescimento das tecnologias de liquefação de gás natural (LNG) e o fracionamento avançado das correntes gasosas permitiram a ampliação do comércio internacional e a viabilização de rotas integradas de poligeração, conectando o processamento do gás à produção de hidrogênio e sistemas híbridos de energia (Mehrpooya et al., 2018). No processamento primário do gás natural, as unidades de recuperação de LGN são responsáveis pela separação dos hidrocarbonetos mais pesados presentes na corrente gasosa, possibilitando a obtenção de frações de alto valor agregado, como etano, propano e butano. Esses processos contribuem simultaneamente para o atendimento às especificações de qualidade do gás comercial e para o aumento do aproveitamento econômico da matéria-prima, ao transformar o gás bruto em múltiplos produtos destinados à indústria petroquímica e a outros segmentos industriais (Shamsi et al., 2024; Norouzi et al., 2024; Argueta et al., 2025).

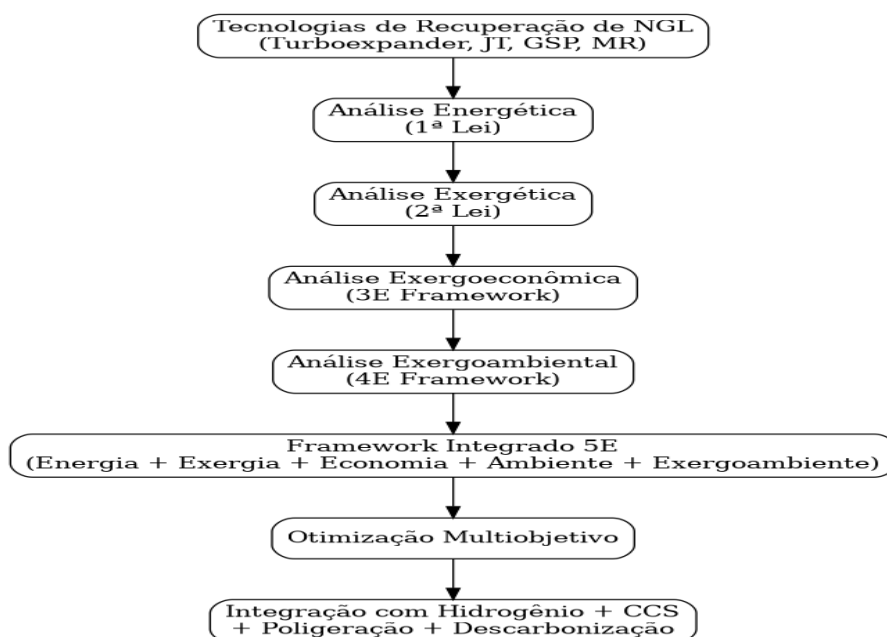
Sob o ponto de vista técnico e operacional, a recuperação de líquidos de gás natural é fundamental para adequar a qualidade do gás processado, reduzir a formação de condensados durante o transporte e aumentar a eficiência das unidades de processamento. O desempenho dessas plantas depende diretamente da tecnologia empregada, sendo os processos baseados em turboexpansores, expansão Joule–Thomson (JT), refrigeração mecânica e Gas Subcooled Process (GSP) as configurações mais utilizadas, cada uma apresentando vantagens e limitações em termos de recuperação de LGN, consumo energético e desempenho exergético (Shamsi et al., 2024a; Shamsi et al., 2024b; Argueta et al., 2025).

Estudos recentes demonstram que os maiores consumos de energia e as principais destruições de exergia concentram-se nos sistemas de compressão, refrigeração e regeneração de solventes amínicos, reforçando a importância da integração

energética, da otimização operacional e da recuperação de calor para reduzir custos e impactos ambientais (Norouzi et al., 2024; Ellaf et al., 2024; Kazmi et al., 2024; Lopez et al., 2025; Zhu et al., 2024).

Como consequência, as metodologias de avaliação avançaram para abordagens multidimensionais capazes de integrar indicadores energéticos, exergéticos, econômicos e ambientais. Abordagens baseadas em avaliações 3E, 4E e 5E têm sido amplamente empregados para identificar irreversibilidades, comparar configurações de processo e apoiar a otimização de tecnologias de recuperação de LGN, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e sustentáveis (Pourfayaz et al., 2025; You et al., 2024; Lin et al., 2026; Kazemi, 2025). A Figura 1 sintetiza essa trajetória evolutiva observada na literatura científica recente.

Figura 1: Evolução das pesquisas sobre recuperação de líquidos de gás natural (NGL)



Fonte: Autores (2026)

A evolução das metodologias aplicadas às tecnologias de recuperação de LGN iniciou-se com análises baseadas na Primeira Lei da Termodinâmica que era limitada à avaliação energética global. Já quando houve a introdução da análise exergética, permitiu identificar irreversibilidades internas e quantificar perdas por

componente, enquanto análises integradas consolidaram as abordagens 3E e 4E. Mais recentemente, as avaliações 5E passaram a integrar dimensões energéticas, exergéticas, econômicas e ambientais em sistemas complexos de energia, incluindo processos de liquefação, purificação e recuperação de gás natural (Ellaf et al., 2024; Kazmi et al., 2024; You et al., 2024).

Apesar desse avanço, a literatura ainda concentra-se em análises isoladas de tecnologias específicas, com poucas comparações sistemáticas entre diferentes configurações criogênicas sob uma mesma basemetodológica. Estudos envolvendo turboexpansores, expansão JT e processos híbridos continuam sendo frequentemente avaliados de forma independente, assim como diferentes configurações de purificação e liquefação.

Além disso, ainda há desafios na aplicação consistente das abordagens 4E e 5E em tecnologias como o GSP e em estudos de otimização integrada (Argueta et al., 2025; Lin et al., 2026; Kazemi, 2025). Para superar estes problemas, o objetivo deste artigo, por meio do método Knowledge Development Process - Constructivist (ProKnow-C) e pelo pacote Bibliometrix em ambiente R, é realizar um mapeamento sistemático e crítico da literatura científica global focada na avaliação exergoambiental e multidimensional de tecnologias de processamento, purificação e recuperação de líquidos de gás natural, identificando as tendências e os principais focos de destruição de exergia.

2. Metodologia

2.1 Natureza da Pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura associada a uma análise bibliométrica de caráter exploratório, quantitativo e qualitativo. Para garantir a replicabilidade e o rigor acadêmico, utilizou-se o método ProKnow-C que contribui para a seleção sistemática do referencial teórico, associado à análise computacional do pacote Bibliometrix para a linguagem R. A Figura 2 traz o esquema metodológico dividido em quatro fases principais.

Figura 2: Percurso Metodológico



Fonte: Autores (2026)

Essas quatro etapas operam de maneira integrada e sequencial, onde a fase 1 delimita o universo inicial de busca; a 2 mapeia o estado da arte por meio de critérios de relevância temática e reconhecimento científico; a 3 identifica as tendências da literatura; e a fase 4 promove o exame qualitativo dos textos selecionados. Dessa forma, a combinação do ProKnow-C com o Bibliometrix confere à pesquisa uma base metodológica que transforma os dados bibliográficos brutos em material específico para responder ao problema de pesquisa proposto.

2.2 Estratégia de Busca Bibliográfica

Foram selecionadas as bases de dados Scopus e Web of Science, devido à sua abrangência internacional e à compatibilidade de seus metadados com a ferramenta de análise bibliométrica. A string de busca, apresentada na Tabela 1, foi gerada a partir dos eixos temáticos da pesquisa que foram operacionalizados por meio de palavras-chave combinadas com operadores booleanos.

Tabela 1: String de Busca

Bloco	Termos Utilizados
-------	-------------------

Recuperação de NGL	("natural gas liquids" OR NGL OR "gas liquids" OR "recovery hydrocarbon liquids" OR "recovery natural gas liquids" OR "NGL recovery" OR "recovery gas processing")
Exergia	(exergy OR exergetic OR exergoenvironmental OR "exergy analysis" OR "thermodynamic analysis" OR "exergy destruction")
Aspecto ambiental	("CO2 emissions" OR emissions OR "carbon emissions" OR "decarbonization" OR "environmental impact")

Fonte: Autores (2026)

O download dos metadados foi realizado nos formatos .bib, totalizando um banco de dados bruto com 1.072 documentos, sendo 1.063 oriundos da base Scopus e 9 da base Web of Science. A busca foi restrita a artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares, nos últimos 5 anos e redigidos em inglês.

Com o portfólio consolidado e os metadados refinados, iniciou-se a etapa quantitativa utilizando o pacote Bibliometrix operado em ambiente RStudio por meio da interface gráfica Biblioshiny. Esta fase compreendeu o mapeamento estatístico dos indicadores de produção científica, padronização das informações, exploração os dados, gerando visualizações gráficas e analisando a produção científica desse intervalo de tempo.

3. Resultados Bibliométricos

O mapeamento do portfólio composto por 1.063 documentos distribuídos em 295 fontes revela um campo científico em estágio de consolidação e bastante dinâmico. Ao cruzar as variáveis de temporalidade, geografia, liderança de autoria e tendências conceituais, evidencia-se um ecossistema de pesquisa que opera sob demandas geopolíticas e tecnológicas interdependentes.

A análise bibliométrica foi realizada a partir de uma base de artigos científicos publicados entre 2021 e 2026, distribuídos em 295 fontes de publicação. A Tabela 2 sintetiza as principais características da produção científica analisada.

Tabela 2: Informações Gerais da Base de Dados

Descrição	Resultado
Período de Análise	2021–2026
Fontes (Periódicos, Livros, Anais etc.)	295
Documentos	1.063

Idade Média dos Documentos	2,24 anos
Média de Citações por Documento	13,79
Conteúdo dos documentos	
Palavras-chave dos Autores	3.435
Autores	
Número de Autores	3.140
Autores de Documentos de Autoria Única	18
Colaboração entre autores	
Coautores por Documento	5,1
Coautorias Internacionais (%)	0,5644
Tipos de documentos	
Artigos Científicos	1.063

Fonte: Autores (2026)

Os resultados indicam uma literatura recente, com idade média de 2,24 anos e média de 13,79 citações por documento, evidenciando elevado impacto científico das publicações recuperadas.

Foram identificadas 3.435 palavras-chave fornecidas pelos autores, demonstrando ampla diversidade temática e caráter multidisciplinar das pesquisas. Em relação à autoria, os 1.063 artigos foram produzidos por 3.140 pesquisadores, com média de 5,1 autores por documento. Apenas 18 publicações foram elaboradas individualmente, evidenciando forte colaboração científica. Por outro lado, a taxa de coautoria internacional foi de apenas 0,56%, indicando limitada interação entre grupos de pesquisa de diferentes países.

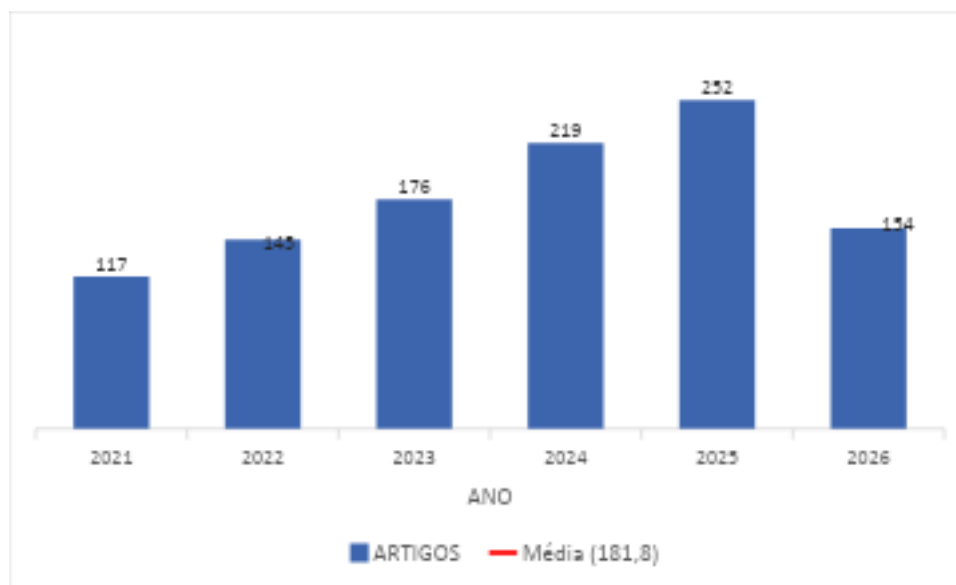
A grande quantidade de fontes e de palavras-chave, demonstra a diversidade e amplitude das áreas envolvidas na temática, enquanto a média de citações por documento evidencia o reconhecimento acadêmico das pesquisas.

3.1 Evolução temporal das publicações

No horizonte temporal delimitado no período de 2021 a 2026, configura uma janela amostral de atual, com crescimento evidente.

Em 2021, a base apresentava 117 artigos publicados, porém houve um crescimento contínuo e acentuado nos anos seguintes, passando para 145 artigos em 2022, 176 em 2023, 219 em 2024 e 252 artigos em 2025, como apresentado no Gráfico 1.

Gráfico 1: Publicações ao longo dos anos



Fonte: Autores (2026)

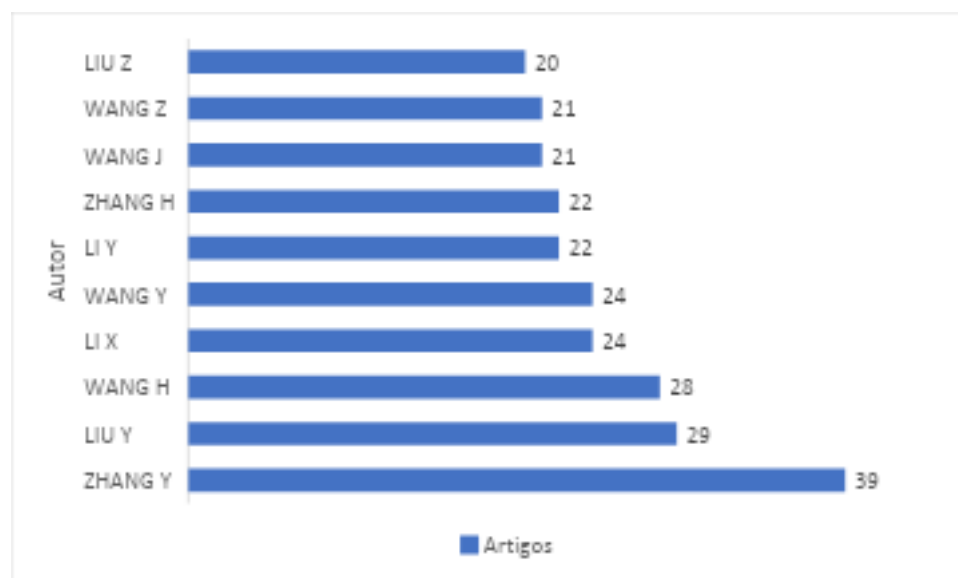
Esse salto de 117 para 252 publicações demonstra um crescimento de aproximadamente 115,4% em quatro anos, evidenciando que o tema passou por um forte processo de expansão, tornando-se uma vertente de pesquisa relevante, dinâmica e atrativa.

A média do período analisado estabeleceu-se em 181,8 publicações anuais, entretanto, a partir do ano de 2024, o volume de artigos superou de forma consistente essa linha média, marcando o ponto em que deixou de ser um nicho teórico e passou a consolidar-se como uma tendência dominante nas ciências térmicas e ambientais. Seguindo esse crescimento, o ano de 2026 demonstra potencial para se alinhar ou até superar o quantitativo de publicação dos anos anteriores pois, somente o primeiro semestre já acumula um total de 154 artigos indexados, montante que representa mais da metade de toda a produtividade científica registrada no ano anterior (2025). Tal cenário reforça uma oportunidade para o desenvolvimento de novos estudos, dado que o fluxo de absorção e difusão de conhecimento na área permanece em plena fase ativa e de forte apelo global.

3.2 Principais autores e países

A estrutura de autoria identificada no portfólio e apresentada no Gráfico 2 revela um ecossistema científico fortemente centralizado, ficando a maior parte das publicações de autoria de pesquisadores, geralmente, associados a universidades e centros de pesquisa governamentais asiáticos. Essa alta concentração de produção por determinados pesquisadores é ditada diretamente pelos planos quinquenais e pelas metas rigorosas de descarbonização e eficiência industrial estabelecidas na Ásia (Song et al., 2025).

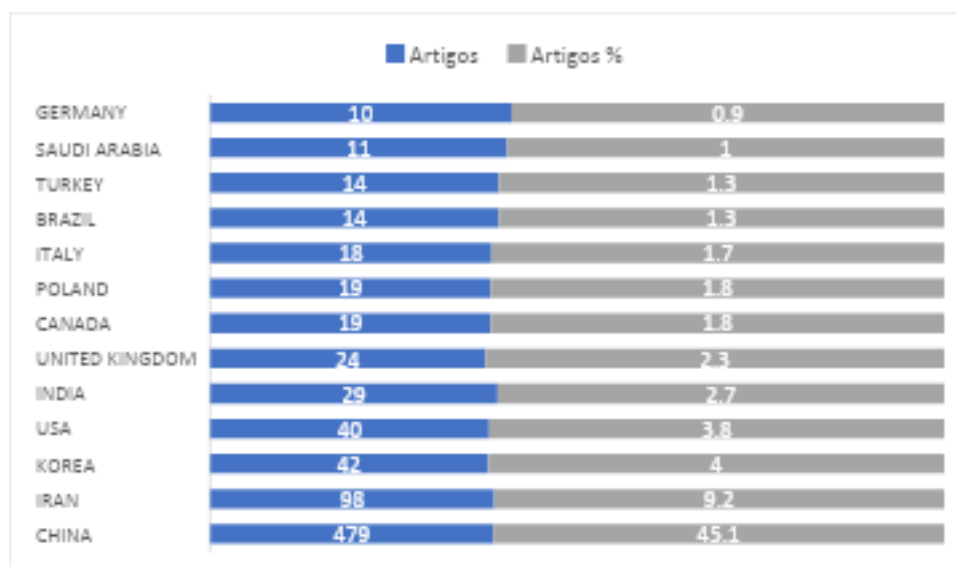
Gráfico 2: Principais Autores



Fonte: Autores (2026)

Esse modelo de cooperação interna e o consequente monopólio intelectual refletem-se diretamente na distribuição geográfica das publicações, conforme ilustrado no Gráfico 3. Onde percebe-se que o crescente aumento na produtividade dos últimos anos é protagonizado principalmente pela China, que desponta como o país de origem de 479 artigos, mais de 45% de toda a produção mundial. Esse volume é more than five times superior ao do segundo colocado, o Irã (98 artigos), e supera a produção somada de todas as demais doze principais nações listadas no ranking de frequência.

Gráfico 3: Frequência de publicações por países



Fonte: Autores (2026)

O Brasil aparece no ranking com 14 artigos publicados, demonstrando um campo aberto de pesquisa para a aplicação de ferramentas termodinâmicas avançadas adaptadas às particularidades da matriz energética brasileira e do processamento de LGN no mercado nacional.

3.3 Palavras chaves e mapa conceitual

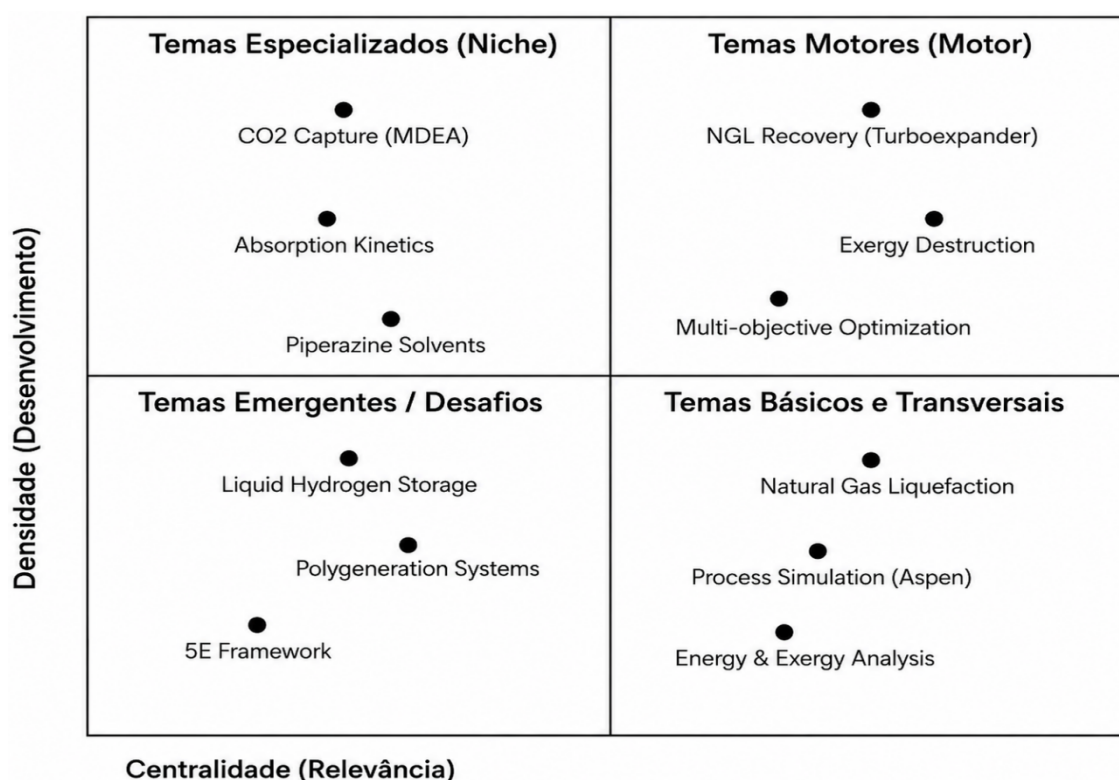
A análise integrada da rede de coocorrência de palavras-chave e do mapa temático permitiu compreender não apenas os principais tópicos investigados pela literatura sobre recuperação de NGL, mas também o nível de maturidade e relevância estratégica desses temas no contexto científico atual.

A rede de palavras-chave evidenciou elevada frequência dos termos "exergy", "natural gas", "NGL recovery", "optimization", "energy efficiency", "LNG", "hydrogen production" e "carbon capture". A forte interconectividade observada entre esses termos indica que a literatura tem evoluído para abordagens multidisciplinares, nas quais desempenho termodinâmico, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica são analisados de forma integrada.

Quando associada ao mapa temático, essa rede permite identificar a posição estratégica de cada grupo temático dentro do campo de pesquisa, como mostrado na Figura 3. Os temas relacionados à análise exergética, otimização de processos e

processamento de gás natural aparecem como temas motores, caracterizados por elevada centralidade e densidade. Isso demonstra que esses assuntos possuem grande relevância para o desenvolvimento da área e apresentam elevado grau de consolidação científica.

Figura 3: Mapa temático conceitual da literatura sobre recuperação de líquidos de gás natural (NGL), relacionando os clusters identificados pela análise de coocorrência de palavras-chave segundo sua centralidade e densidade.



Fonte: Autores (2026)

Por outro lado, tópicos como captura de carbono, produção de hidrogênio, integração energética e avaliação exergoambiental surgem como temas emergentes, refletindo as transformações oriundas da transição energética global e pelas metas de descarbonização da indústria de petróleo e gás. Embora ainda apresentem menor densidade científica, esses temas possuem crescente centralidade e tendem a assumir papel estratégico nos próximos anos.

Os resultados também indicam que estudos tradicionais focados em eficiência energética vêm gradualmente perdendo protagonismo para abordagens integradas baseadas em análises 4E e 5E. Essa evolução demonstra uma mudança na

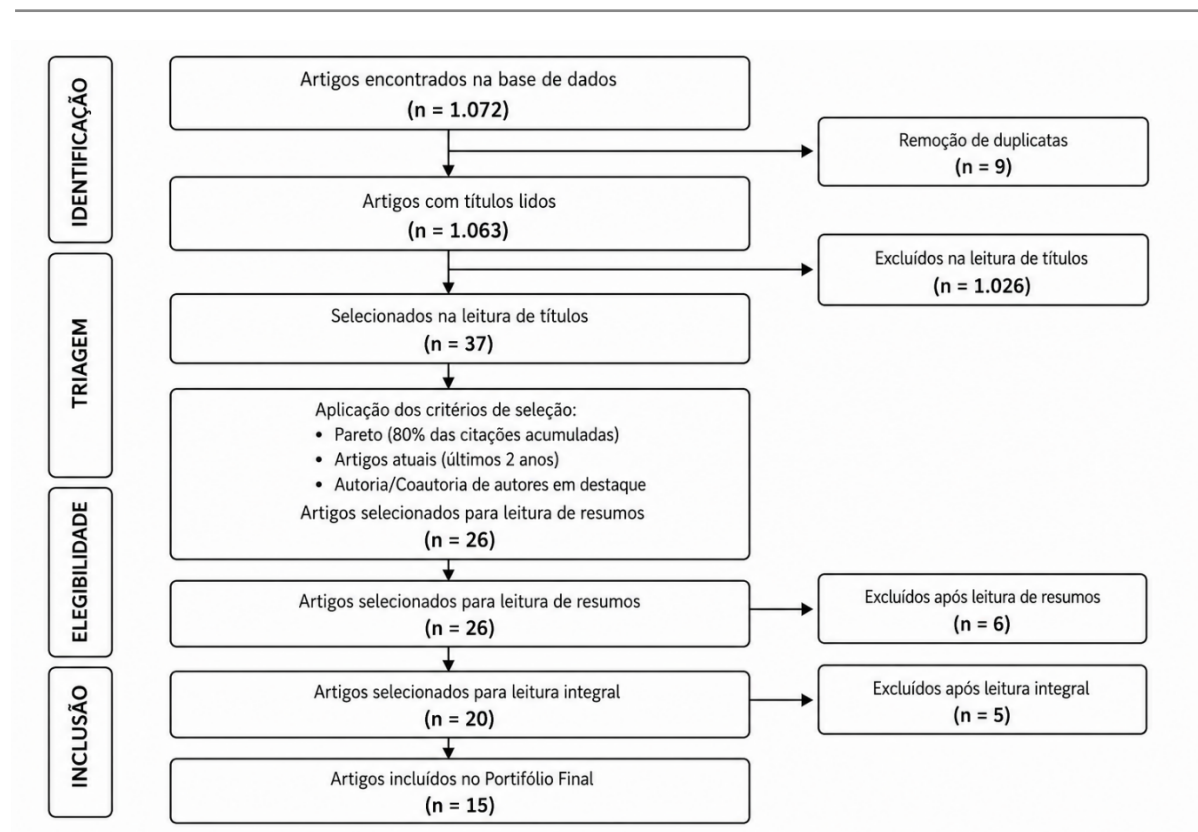
literatura, na qual a maximização da eficiência energética deixa de ser o único objetivo e passa a ser complementada pela busca simultânea de desempenho ambiental, econômico e exergético.

Essa combinação entre a análise de coocorrência de palavras-chave e o mapa temático revela uma trajetória evolutiva do campo científico, que parte de estudos centrados em processos criogênicos convencionais e avança para sistemas energéticos complexos, integrando recuperação de NGL, captura de carbono, hidrogênio e otimização multiobjetivo. Essa tendência reforça a necessidade de pesquisas futuras capazes de comparar diferentes tecnologias sob uma mesma estrutura metodológica exergoambiental, consolidando uma agenda de pesquisa alinhada aos desafios atuais de sustentabilidade energética.

3.4 Processo de seleção — ProKnow-C

Nesta fase, aplicou-se o processo de afunilamento estruturado do ProKnow-C para analisar o banco de dados bruto e constituir o Portfólio Bibliográfico Final (PBF), a partir dos metadados oriundos do banco de dados que servirá de alimentação para o BIBLIOMETRIX. A Figura 4 traz o diagrama de fluxo PRISMA, que esquematiza o processo de refinamento do banco de dados bruto.

Figura 4: Diagrama de fluxo PRISMA



Fonte: Autores (2026)

Após inserir os metadados, a primeira etapa consiste na eliminação de duplicatas, decorrentes da sobreposição entre as bases de dados. De forma automatizada, dos 1.072 artigos, 9 artigos duplicados foram identificados e removidos.

Com os 1.063 artigos restantes, realizou-se uma leitura individualizada apenas dos títulos, excluindo-se 1.026 aqueles cujo foco temático não apresentava aderência direta ao objetivo desta pesquisa. Para os 37 artigos sobreviventes, extraiu-se o número de citações acumuladas por meio do método de Pareto, que se estabeleceu um ponto de corte de representatividade científica de 80% das citações. Os artigos pertencentes a esse grupo integraram o "banco de artigos de destaque". Os artigos menos citados, porém publicados nos últimos dois anos, foram mantidos sob a premissa de que o baixo número de citações decorria do pouco tempo de exposição na literatura. Da mesma forma, artigos fora dos 80% que tiveram autoria/coautoria dos autores em destaque também foram considerados e mantidos.

A partir daí, procedeu-se à leitura dos resumos dos 26 artigos validados na etapa anterior e, subsequentemente, à leitura analítica e integral dos 20 documentos

selecionados. Aqueles que confirmaram aderência total ao escopo investigado consolidaram o PBF, composto por 15 artigos.

4. Análise Sistemática

A recuperação de LGN desempenha papel estratégico na cadeia de processamento do gás natural, uma vez que possibilita a separação e o aproveitamento de componentes de elevado valor agregado, como etano, propano, butano e gasolina natural. Além de aumentar a rentabilidade das unidades de processamento, a recuperação de LGN contribui para a adequação das especificações de transporte e comercialização do gás natural (Shamsi, 2024). Entretanto, tais processos são caracterizados por elevada intensidade energética, especialmente quando empregam tecnologias criogênicas, resultando em custos operacionais significativos e impactos ambientais associados ao consumo de energia e às emissões de gases de efeito estufa (Naquash, 2023). Diante desse desafio técnico e ambiental, a comunidade científica internacional tem concentrado esforços no desenvolvimento de modelagens e otimizações de sistemas térmicos (Song et al., 2025).

Como resultado do processo de seleção conduzido pelo método ProKnow-C, o Quadro 1 apresenta uma síntese do PBF, composto por 15 artigos representativos do estado da arte sobre tecnologias e metodologias aplicadas ao processamento de gás natural. Os estudos foram organizados de acordo com sua aplicação, tecnologia empregada, abordagem metodológica, principais contribuições e limitações identificadas. O portfólio abrange as principais etapas do processamento de gás natural, incluindo a recuperação de líquidos de gás natural (NGL), o adoçamento e a purificação do gás, a liquefação de gás natural (LNG) e sistemas integrados de poligeração. Essa diversidade de aplicações evidencia a evolução das abordagens de avaliação, que passaram de análises energéticas convencionais para metodologias integradas capazes de considerar, de forma simultânea, aspectos termodinâmicos, econômicos e ambientais, com destaque para as abordagens 4E e 5E.

Quadro 1: Síntese dos estudos do PBF sobre processamento de gás natural, tecnologias de recuperação de NGL e abordagens integradas

Artigo	Aplicação	Tecnologia / Processo	Abordagem	Principais resultados	Limitação identificada
Ellaf et al. (2023)	Adoçamento de gás natural	Solventes híbridos (MDEA)	5E	Solventes híbridos reduziram simultaneamente consumo energético, custos e impactos ambientais.	Restrito à etapa de adoçamento, sem integração com recuperação de NGL.
Pourfayaz et al. (2025)	Liquefação	C3MR	5E	Aplicou avaliação integrada energia, exergia, economia, exergoeconomia, exergoambiental.	Não aplicada à recuperação de NGL.
Naquash et al. (2023)	Integração energética	LNG + NGL + H ₂	4E	A integração entre processos aumentou significativamente a eficiência energética e reduziu impactos ambientais.	Avaliação aplicada a sistema integrado, não a unidades convencionais de NGL.
Lin et al. (2026)	Poligeração	Recuperação criogênica + H ₂	4E	Demonstrou ganhos simultâneos de eficiência energética, econômica e ambiental.	Aplicação restrita a sistemas de poligeração.
Norouzi et al. (2022)	Liquefação e recuperação de líquidos	Cascata de refrigeração	3E	Identificou compressores e trocadores de calor como principais responsáveis pelas irreversibilidades.	Não realiza avaliação ambiental.
Shamsi et al. (2022)	Recuperação de NGL	JT × Refrigeração Mecânica	Energia e Exergia	A refrigeração mecânica apresentou menor destruição de exergia que o processo JT convencional.	Não incorpora avaliação econômica e ambiental integrada.
Shamsi et al. (2024)	Recuperação de NGL	JT × TE × JT+MR	Comparativa	O turboexpansor apresentou maior recuperação de líquidos e melhor eficiência termodinâmica.	Não avalia emissões indiretas nem indicadores ambientais.
Argueta et al. (2025)	Recuperação de NGL	GSP	Exérgica e Exergoeconômica	Comparou configurações do processo GSP para o mercado brasileiro,	Não incorpora metodologias para estimativa das emissões

				identificando o turboexpansor como a alternativa de melhor desempenho termodinâmico e econômico.	indiretas de CO ₂ nem abordagens 4E ou 5E.
Kazemi (2025)	Recuperação de NGL	Framework integrado	Técnica, Econômica e Ambiental	Propôs estrutura multicritério para avaliação de tecnologias de recuperação de NGL.	Framework ainda necessita validação em estudos comparativos.
You et al. (2023)	Sistema de trigerção	SOFC + trigerção	Exergética, Exergoeconômica e Exergoambiental	Demonstrou que a integração das análises melhora a identificação de oportunidades de otimização ambiental e energética.	Não aplicado ao processamento de gás natural.
Kazmi et al. (2022)	Purificação de gás natural	Solventes amínicos e piperazina	Exergética, Exergoeconômica e Exergoambiental	Solventes híbridos apresentaram melhor desempenho global e menores irreversibilidades.	Não considera as etapas subsequentes de recuperação de NGL.
Zhu et al. (2022)	Adoçamento de gás	Sweetening	Otimização energética	A otimização reduziu o consumo energético mantendo a eficiência operacional.	Não inclui análises exergéticas ou ambientais.
Jinxi et al. (2023)	Liquefação	Diferentes configurações	Técnica, Econômica e Ambiental	Comparou diferentes ciclos industriais sob critérios técnicos, econômicos e ambientais.	Não incorpora análise exergética.
Lopez et al. (2025)	Captura de CO ₂	MDEA	Exergética	Reduziu a destruição de exergia por modificações na regeneração do solvente.	Não incorpora critérios econômicos e ambientais.
Haider et al. (2025)	Captura de CO ₂	Solventes amínicos	Revisão	Sistematizou os mecanismos de absorção química de CO ₂ .	Não realiza avaliação termodinâmica integrada.

Fonte: Autores (2026)

A distribuição das tecnologias e abordagens apresentada no Quadro 1 evidencia que o avanço metodológico da área ocorreu de forma mais acelerada do que a diversificação das aplicações. Enquanto novas metodologias de avaliação (3E, 4E e 5E) vêm sendo incorporadas progressivamente, as tecnologias investigadas

permanecem concentradas em poucas configurações de recuperação de NGL, que constitui a principal aplicação investigada no âmbito do processamento de gás natural, sendo predominantes os estudos voltados à comparação entre tecnologias baseadas na expansão Joule–Thomson (JT), turboexpansores (TE) e configurações híbridas. Embora essas tecnologias apresentem diferentes características operacionais, observa-se consenso de que a análise exergética representa uma ferramenta mais robusta que a análise energética convencional, por permitir identificar as irreversibilidades termodinâmicas responsáveis pelas perdas de desempenho e direcionar estratégias de otimização dos processos.

Em conjunto, os estudos demonstram que os sistemas baseados em turboexpansores apresentam, de maneira recorrente, maior recuperação de hidrocarbonetos líquidos (C_2+), menores taxas de destruição de exergia e melhor desempenho termodinâmico quando comparados às configurações fundamentadas exclusivamente na expansão Joule–Thomson. Entretanto, essa superioridade não deve ser interpretada de forma generalizada, uma vez que os critérios de avaliação, as condições operacionais, a composição do gás de alimentação e os indicadores empregados diferem significativamente entre os estudos analisados. Essa variedade metodológica dificulta comparações quantitativas diretas e evidencia a necessidade de protocolos padronizados para avaliação das diferentes tecnologias.

Além da comparação entre tecnologias, os trabalhos analisados convergem ao identificar compressores, trocadores de calor e sistemas de refrigeração como os principais responsáveis pelas irreversibilidades termodinâmicas nas plantas de processamento de gás natural. Esses componentes concentram as maiores perdas exergéticas e, conseqüentemente, representam os principais alvos para estratégias de integração energética, recuperação de calor e otimização operacional, aspecto corroborado por estudos envolvendo diferentes configurações criogênicas e processos do tipo GSP.

Outro aspecto relevante evidenciado pela revisão refere-se à evolução das metodologias de avaliação. Enquanto os estudos mais antigos concentram-se predominantemente em análises energéticas e exergéticas convencionais, as pesquisas mais recentes incorporam progressivamente dimensões econômicas e

ambientais por meio das abordagens 3E, 4E e 5E. Essa evolução demonstra uma mudança de paradigma na literature, na qual a maximização da eficiência energética deixa de constituir o único objetivo da otimização, passando a ser complementada pela avaliação simultânea da viabilidade econômica e dos impactos ambientais das diferentes configurações de processo.

A aplicação dessas abordagens, entretanto, ainda ocorre de forma desigual entre as etapas do processamento de gás natural. Nos processos de adoçamento e purificação, observa-se maior maturidade na integração entre análises exergéticas, exergoeconômicas e exergoambientais, principalmente em estudos envolvendo solventes híbridos à base de MDEA e piperazina, os quais demonstram reduções simultâneas do consumo energético, dos custos operacionais e dos impactos ambientais associados à regeneração dos solventes. Em contrapartida, na recuperação criogênica de NGL predominam análises exergéticas e exergoeconômicas, permanecendo limitada a incorporação explícita de indicadores ambientais e das abordagens 4E e 5E, o que restringe avaliações mais abrangentes sobre sustentabilidade.

A revisão também evidencia uma ampliação gradual do escopo das pesquisas. Enquanto parte dos trabalhos concentra-se na otimização de equipamentos ou unidades específicas, estudos mais recentes expandem suas análises para sistemas integrados envolvendo recuperação de NGL, liquefação de gás natural (LNG), captura de carbono e produção de hidrogênio. Essa evolução indica que o foco da literatura desloca-se da otimização isolada de processos para a integração energética entre diferentes unidades industriais, favorecendo o aproveitamento das utilidades térmicas, a redução do consumo específico de energia, a diminuição dos custos operacionais e a mitigação simultânea dos impactos ambientais.

Apesar desse avanço metodológico, permanecem limitações importantes na literatura. Observa-se escassez de estudos comparativos conduzidos sob condições operacionais equivalentes, diferenças na definição dos indicadores de desempenho utilizados pelos autores e ausência de estruturas metodológicas capazes de integrar simultaneamente análises exergéticas, exergoeconômicas, exergoambientais e estimativas das emissões indiretas de CO₂ associadas ao fornecimento externo de

eletricidade e utilidades térmicas. Essa lacuna é particularmente crítica no contexto da transição energética, no qual a pegada de carbono global das plantas de processamento assume papel determinante nas decisões de investimento e licenciamento ambiental.

5. Considerações Finais

Com o objetivo de realizar um mapeamento sistemático e quantitativo do estado da arte global referente à avaliação exergoambiental (3E, 4E e 5E) aplicada às tecnologias de processamento, purificação e recuperação de NGL, este estudo utilizou-se da abordagem mista, que integrou o rigor metodológico do método *ProKnow-C* à capacidade de processamento estatístico do pacote Bibliometrix, que permitiu analisar um banco de dados bruto de 1.063 documentos e consolidar um PBF representativo, composto por 15 artigos.

Os resultados bibliométricos revelaram que o campo de pesquisa aumenta num ritmo acelerado, evidenciado por um crescimento de 72,4% na taxa de publicação anual entre os anos de 2022 e 2025, além de uma idade média recente dos documentos de apenas 2,24 anos. Do ponto de vista geopolítico e de autoria, há uma clara centralização da produção científica em instituições e centros de pesquisa governamentais da Ásia, liderada pela China (479 artigos) e seguida pelo Irã (98 artigos). Em contrapartida, o Brasil aparece de forma tímida no ranking (14 artigos) revelando um importante espaço de oportunidade acadêmica e tecnológica para a aplicação e adaptação de ferramentas termodinâmicas avançadas às especificidades do mercado nacional e ao comportamento de processos estratégicos como o GSP.

Ao analisar o PBF, as rotas criogênicas se mostraram melhor difundidas no mercado brasileiro, principalmente os sistemas baseados em turboexpansores que se consolidam como as rotas dominantes e de maior ecoeficiência para a recuperação de frações líquidas de alto valor comercial (etano, propano e butano). Quando comparados à expansão pura por efeito Joule-Thomson ou à refrigeração mecânica isolada, os turboexpansores apresentam taxas substancialmente menores de destruição de exergia e maior seletividade de recuperação de hidrocarbonetos pesados, mitigando as irreversibilidades em regimes de baixas temperaturas.

As discussões voltadas ao adoçamento e captura de CO₂ concentram-se na otimização de sistemas de absorção química baseados em solventes amínicos como a MDEA. Constata-se que modificações estruturais nas colunas strippers, como a substituição de refeeders tradicionais por sistemas de injeção direta de vapor e o desenvolvimento de misturas híbridas contendo piperazina, constituem os caminhos mais eficientes para reduzir a demanda por energia térmica de regeneração, minimizando a destruição de exergia nessa etapa.

Evidenciou-se também, um deslocamento definitivo das avaliações energéticas tradicionais em direção a abordagens multidimensionais integrados do tipo 4E e 5E, onde a incorporação do componente exergoambiental se mostrou importante, visto que análises térmicas ou econômicas isoladas falham em detectar que a real fonte de impacto ambiental de uma planta industrial reside na localização e na magnitude de suas irreversibilidades termodinâmicas internas. Apesar do amadurecimento das ferramentas analíticas, ficou clara a escassez de avaliações comparativas padronizadas, que submetam diferentes arquiteturas sob uma mesma base metodológica e a necessidade de alinhar o processamento de NGL às novas rotas de descarbonização.

Em suma, a análise exergoambiental deixa de aparecer como um indicador acadêmico retrospectivo e passa a ser um instrumento importante na tomada de decisão para o projeto, a síntese e a operação de plantas industriais de hidrocarbonetos que busquem alinhar viabilidade econômica, máxima eficiência termodinâmica e conformidade com as metas globais de sustentabilidade.

Como perspectivas futuras, aponta-se que a sobrevivência e a atratividade industrial das plantas de processamento de gás natural dependerão da transição de sistemas isolados para complexos híbridos de poligeração. As tendências de fronteira científica requerem a aplicação de algoritmos de otimização multiobjetivo focados na integração energética profunda, acoplando a recuperação criogênica de NGL à estocagem de hidrogênio líquido, sistemas de regaseificação e células a combustível de óxido sólido (SOFC).

Referências

- ARGUETA FLORES, I. A. *et al.* Exergy and Exergoeconomic Analysis of the Gas Subcooled Process for the Brazilian Market: An Approach to Enhance Natural Gas Liquids Recovery. **ACS Omega**, v. 10, n. 26, p. 28092–28111, 8 jul. 2025.
- ELLAF, A. *et al.* Energy, exergy, economic, environment, exergo-environment based assessment of amine-based hybrid solvents for natural gas sweetening. **Chemosphere**, v. 313, p. 137426, fev. 2023.
- HAIDER, H.; ARIFUTZZAMAN, A.; KHEIREDDINE AROUA, M. 13(x), pp. xxxx-xxxx 1 Mor. **Mor. J. Chem**, v. 2025, 2025.
- IEA (International Energy Agency). Gas 2024: Analysis and forecast to 2027. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/gas-2024>. Acesso em: 13 jun. 2026.
- IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 13 jun. 2026.
- JINXI, W. *et al.* Simulation and technical, economic, and environmental analyses of natural gas liquefaction cycle using different configurations. **Energy**, v. 278, p. 127779, set. 2023.
- KAZEMI, A. Natural gas liquids (NGL) recovery: A framework for environmental, technical and economic assessments and optimizations. **Chemical Engineering Science**, v. 316, p. 121928, out. 2025.
- KAZMI, B. *et al.* Exergy, advance exergy, and exergo-environmental based assessment of alkanol amine- and piperazine-based solvents for natural gas purification. **Chemosphere**, v. 307, p. 136001, nov. 2022.
- LIN, Y. *et al.* Multi-objective optimization and 4E assessment of a natural gas-based polygeneration system with coupling cryogenic NGL recovery, single mixed refrigerant, and hydrogen production units. **Energy**, v. 344, p. 139843, fev. 2026.
- LOPEZ, F. *et al.* CO₂ capture systems using MDEA solvent: stripper with reboiler or with steam? An exergetic evaluation and performance enhancement criteria. **Fuel**, v. 408, p. 137449, mar. 2026.
- NAQUASH, A. *et al.* Liquid hydrogen storage and regasification process integrated with LNG, NGL, and liquid helium production. **Renewable Energy**, v. 213, p. 165–175, set. 2023.
- NOROUZI, N. *et al.* Energy, Exergy, and Exergoeconomic (3E) Analysis of Gas Liquefaction and Gas Associated Liquids Recovery Co-Process Based on the Mixed Fluid Cascade Refrigeration Systems. **Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, v. 41, n. 4, p. 1391–1410, 1 abr. 2022.

POURFAYAZ, F. *et al.* Energy, exergy, economic, exergoeconomic, and exergoenvironmental (5E) analysis of natural gas liquefaction through the C3MR cycle. **Energy Reports**, v. 14, p. 4160–4172, dez. 2025.

SHAMSI, M. *et al.* Tuning the natural gas dew point by Joule-Thomson and Mechanical Refrigeration processes: A comparative energy and exergy analysis. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 212, p. 110270, maio 2022.

SHAMSI, M. *et al.* A comprehensive comparison of the turbo-expander, Joule-Thomson, and combination of mechanical refrigeration and Joule-Thomson processes for natural gas liquids production. **Energy**, v. 295, p. 131032, maio 2024.

SONG, Li *et al.* A política industrial direcionada pode impulsionar a transformação para uma economia de baixo carbono? Evidências dos Planos Quinquenais da China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 13, 2025.

YOU, H. *et al.* Thermodynamic, exergoeconomic and exergoenvironmental analyses and optimization of a solid oxide fuel cell-based trigeneration system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 66, p. 25918–25938, ago. 2023.

ZHU, W. *et al.* Simulation-Based Optimization of a Multiple Gas Feed Sweetening Process. **ACS Omega**, v. 7, n. 3, p. 2690–2705, 25 jan. 2022.